Untersuchungen zur physiologischen Blendung

Erwin Hartmann

1962

UNTERSUCHUNGEN ZUR PHYSIOLOGISCHEN BLENDUNG

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
E r w i n H a r t m a n n
aus München

München 1961

Berichterstatter:

Prof. Dr.Dr. H. Schober
Institut für Medizinische Optik
der Universität München

Prof. Dr. W. Rollwagen
II. Physikalisches Institut
der Universität München

Tag der mündlichen Prüfung:
28.2.62

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Inhaltsverzeichnis

Einführung 1
Einleitung (Allgemeine Vorbemerkungen) 1
Die Parameter 9
Das Kriterium 10
Die Versuchspersonen 11
Blendquellen 14
Die Meßbedingungen 16
Meßvorgang und Aussagewahrscheinlichkeit 17
Meßgenauigkeit 20

Durchführung der Versuche und Ergebnisse 21
1) Einfluß der Lichtfarbe 21
2) Einfluß der Lage der Blendquelle im Gesichtsfeld 23
3) Einfluß der Entfernung und der Leuchtdichte der Blendquelle, sowie der Hornhautbeleuchtungsstärke 24
4) Einfluß der Blendquellenfläche 25
5) Der Blendungsgrad 28
6) Der Einfluß der Grundadaptationsleuchtdichte auf die Blendung 29
7) Der Einfluß der Hornhautbeleuchtungsstärke auf Unterschiedsempfindlichkeit und Blendungsgrad 32
8) Der Einfluß des Blendwinkels 34
9) Zusammenfassung der verschiedenen Einflußgrößen 39
10) Das Additionstheorem der Blendung 41
11) Der Blendwinkel bei ausgedehnten Blendquellen 41
12) Einäugige- beidäugige Blendung 42
13) Die Wirkung von Windschutzscheiben und Brillengläsern bei Blendung 44

Zusammenfassung 46
Literaturverzeichnis 47

Untersuchungen zur physiologischen Blendung

Einführung:

Im Bereich der physiologischen Optik gibt es verschiedene Gebiete, in denen bis heute noch keine einheitliche Auffassung existiert. Das bekannteste Problem ist das Farbensehen, weniger bekannt, aber von wachsender Bedeutung ist die Blendung. Sowohl die theoretischen Überlegungen als auch die praktischen Meßergebnisse sind verschieden; letztere vor allem deshalb, weil die Vielzahl der physikalischen, physiologischen und psychischen Parameter einen unmittelbaren Vergleich der Messungen außerordentlich erschweren. Es war daher Zweck der vorliegenden Arbeit, durch möglichst breit angelegte Untersuchungen den Einfluß der verschiedenen Größen auf die Grundsehfunktionen zu ermitteln und damit einen Beitrag zur endgültigen Klärung der Blendungsfrage zu liefern.

Einleitung: (Allgemeine Vorbemerkungen)

Wir unterscheiden heute zwischen physiologischer und psychologischer Blendung, entsprechend den in der englisch-amerikanischen Literatur gebräuchlichen Bezeichnungen "disability glare" und "discomfort glare". Unter physiologischer Blendung versteht man die meßbare Änderung einer Grundsehfunktion unter dem Einfluß einer oder mehrerer Störlichtquellen. Die Meßergebnisse und die Folgerungen sind ohne weiteres auf alle Personen übertragbar, deren Sehfunktionen mit denjenigen der Versuchspersonen übereinstimmen. Zur Ermittlung des psychologischen Blendungsgrades wertet man das qualitative Urteil eines großen Personenkreises statistisch aus. Diese Ergebnisse werden im allgemeinen wiederum auf ein großes Kollektiv angewendet. Über die Wirkung auf die Sehleistung einzelner Personen lassen sich hier nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen.

Aufgrund dieser Festlegung ergeben sich bereits die Hauptanwen-

dungsgebiete der beiden Blendbegriffe. Die physiologische Blendung wird besonders dann eine Rolle spielen, wenn es überwiegend auf die Leistung des Sehorganes ankommt, insbesondere im gesamten Verkehrswesen. Die psychologische Blendung wird man zu Rate ziehen, wenn es sich darum handelt, einem größeren Personenkreis unbekannter Zusammensetzung möglichst angenehme Beleuchtungsverhältnisse zu schaffen. Das Hauptanwendungsgebiet liegt hier im Bereich der allgemeinen Innenraumbeleuchtung von Verwaltungs- und Fabrikgebäuden, sowie von Wohnräumen. Naturgemäß ist es in der Praxis nicht möglich, die Aufgabengebiete so scharf abzugrenzen. So wird z.B. die Güte der Straßenbeleuchtung häufig mit den Mitteln der psychologischen Blendung bewertet, während man umgekehrt spezielle Probleme der Innenraum- und Arbeitsbeleuchtung mit der Meßtechnik und dem Formalismus der physiologischen Blendung löst.

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen befassen sich ausschließlich mit der physiologischen Blendung. Das hat im wesentlichen drei Gründe. Erstens: Nur die physiologische Blendung ist mit den Mitteln der Physik und Lichttechnik erfaßbar. Zweitens: Nur die physiologische Blendungsbewertung ermöglicht es, über die Leistungsänderungen des Auges unter dem Einfluß von Störlichtquellen etwas auszusagen. Drittens: Die Erfahrung lehrt, daß bei physiologischer Blendung immer gleichzeitig psychologische Blendung vorliegt. Die Umkehrung des letzten Satzes gilt nicht, denn es ist sehr wohl möglich, daß eine Lichtquelle im Gesichtsfeld als störend empfunden wird, obwohl sie keine Sehfunktion meßbar verschlechtert.

An zwei Beispielen soll die Diskrepanz zwischen physiologischer und psychologischer Blendung gezeigt werden.

1. Wie die später beschriebenen Untersuchungen erweisen, ist die Unterschiedsempfindlichkeit bei Blendung unabhängig von der Lichtfarbe der Blendquelle oder des Testfeldes. Die psychologische Blendungsbewertung ergibt nach Untersuchungen von DE BOER, daß die Beleuchtungsstärke am Auge für Glühlampenlicht mit Gelbfilter 25 % höher sein darf als für ungefiltertes "weißes" Licht.
2. Bietet man einer Versuchsperson zwei gleiche Lichtquellen

verschiedener Leuchtdichte an, so daß sich die Quadrate der Abstände wie die Leuchtdichten verhalten, dann erzeugen beide (bei kleinem Sehwinkel, $\sin^2 u \approx u^2$) gleiche Beleuchtungsstärke am Auge. Sind alle anderen Größen (Blendwinkel, Infeldleuchtdichte usw.) für beide Blendsituationen gleich, so ergibt sich, wie die späteren Untersuchungen zeigen werden, gleiche Unterschiedsempfindlichkeit, das heißt, gleiche physiologische Blendung. Eine subjektive (psychologische) Blendungsbewertung ergibt aber bei der Lichtquelle höherer Leuchtdichte die stärkere Blendungsempfindung, weil das menschliche Auge nur Leuchtdichten, nicht aber Beleuchtungsstärken vergleichen kann.

Die physiologische Blendung teilt man weiter auf in Adaptationsblendung, Relativblendung, Absolutblendung und unterscheidet hierbei noch Simultan- und Sukzessivblendung. Die Adaptationsblendung ist weniger ein Blendungsvorgang, sondern stellt letzten Endes ein Adaptationsproblem dar. Die Absolutblendung dagegen gehört vorwiegend in den medizinischen Bereich, denn sie kann bereits zu Augen- bzw. Netzhautschädigungen führen. Unter Blendung im eigentlichen Sinn versteht man daher die Relativblendung, d.h. das gleichzeitige Vorhandensein zu großer Leuchtdichteunterschiede (bzw. wie sich im Verlauf der Untersuchungen zeigen wird, zu großer Lichtstärkeunterschiede) im Gesichtsfeld. Da die Sukzessivblendung wieder auf das Adaptationsproblem führt, wurden die Messungen simultan vorgenommen, d.h. die Störlichtquelle ist während des Sehvorganges wirksam. Die Messungen wurden ferner statisch durchgeführt, die Versuchspersonen hatten also bei jeder Messung genügend Zeit, ihre Adaptation und ihr Sehvermögen optimal einzustellen. Diese Einstellung wurde während der Messung konstant gehalten.

Ein Problem, auf das man bei physiologischen Messungen immer wieder stößt, ist die Wahl der Versuchspersonen. Es ist daher notwendig, dieser Frage besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder man untersucht ein sehr großes Kollektiv und wertet die Ergebnisse statistisch aus oder man sucht sich einen sogenannten Normalbeobachter, der für einen Großteil der Bevölkerung repräsentativ ist. Der erste Weg wird im allgemeinen nur dann beschritten werden, wenn es darauf ankommt, Normalleistungen zu ermitteln, so z.B. bei der Festlegung des spektralen Hellempfindungsgrades des menschlichen Auges. Will man viele Parameter untersuchen und variieren, so ist es schon aus zeitlichen Gründen nicht möglich, alle Untersuchungen auch noch mit einem großen Personenkreis durchzuführen. Der Zeitaufwand ist mindestens proportional der Zahl der verwendeten Versuchspersonen; es sei denn, man verwendet mehrere gleichartige Versuchsanlagen, die aber den finanziellen Aufwand erheblich erhöhen. Für sehr viele Untersuchungen genügt es, mit einem Normalbeobachter zu arbeiten. Das gilt besonders dann, wenn ein spezieller Zusammenhang wohldefinierter physikalischer und physiologischer Größen untersucht werden soll. Kennt man diese Größen, so ist es einfach, die Bedingungen festzulegen, die der Normalbeobachter erfüllen muß. Um die Ergebnisse zusätzlich zu sichern, empfiehlt es sich, die Messungen von Zeit zu Zeit mit einem größeren Personenkreis zu kontrollieren. Damit gewinnt man gleichzeitig die Möglichkeit, Aussagen über die interindividuelle Streubreite zu machen und gewisse Effekte, z.B. die Übung der Versuchspersonen abzuschätzen.

Ein zweites, grundsätzliches Problem bei physiologisch-optischen Messungen bildet die Wahl des Kriteriums. Wenn keine besonderen Gründe dagegen sprechen, wird man eine Auswahl unter den wichtigsten Grundsehfunktionen treffen. Man wählt: Die Unterschiedsempfindlichkeit, das Formenerkennen und die Sehschärfe. Diese Größen sind allerdings voneinander abhängig. Das Formenerkennen und die Sehschärfe werden vom photometrischen Kontrast beeinflußt und somit besteht auch ein Zusammenhang mit dem Reziprokwert des photometrischen Minimalkontrastes, der Unterschiedsem-

pfindlichkeit. Es hängen also auch Sehschärfe und Formenerkennen voneinander ab, was bei der Herstellung von Optotypen zur Sehschärfeprüfung die Hauptschwierigkeit bildet.

Unter den genannten Größen wird die Unterschiedsempfindlichkeit am häufigsten als Kriterium für physiologisch-optische Untersuchungen benutzt. Das hat vorwiegend zwei Gründe: einmal ist sie die elementarste Sehfunktion, denn ein Kontrast ist die Grundvoraussetzung für jeden Sehvorgang, zum anderen ist die Unterschiedsempfindlichkeit nur in sehr geringem Maße von anderen Größen abhängig. Verwendet man aufgrund dieser Überlegungen die Unterschiedsempfindlichkeit als Bezugsgröße, so muß man sich allerdings darüber klar sein, daß ihre praktische Bedeutung sehr gering ist. Der photometrische Kontrast, der ja das Maß für die Unterschiedsempfindlichkeit darstellt, liefert das einfachste optische Signal und versetzt das Auge nur in Bereitschaftszustand. Jede weitere Aussage, auch eine Angabe über die Lage, setzt bereits eine Art Formenerkennen voraus. Wenn man bei der Blendung besonders an den Verkehr denkt, so wird die Unterschiedsempfindlichkeit der Praxis sicher nicht gerecht. Der Verkehrsteilnehmer muß in der Lage sein, zu erkennen, ob das, was er wahrgenommen hat, für ihn von Bedeutung ist. Die entscheidende Aufgabe des Sehorgans ist dementsprechend das Formenerkennen. Will man das Formenerkennen als Kriterium benutzen, so scheitert dies daran, daß es kein einwandfreies Maß für den Grad des Formensehens gibt. Der nächste Schritt wäre nun, die Sehschärfe als Bezugsgröße zu wählen. Das ist grundsätzlich möglich, zumal diese gut definiert und ebenso gut meßbar ist. Darüber hinaus hat sie noch den Vorteil, verschiedene andere Sehfunktionen mit einzuschließen. Allerdings ist die Sehschärfe trotzdem nicht das ideale Kriterium, denn sie hängt, wie orientierende Messungen gezeigt haben, nur über den physiologischen Kontrast von der Blendung ab. Das ist auch ohne weiteres verständlich, wenn man bedenkt, daß die Sehschärfe durch die Optik des Auges bedingt ist. Somit besteht nur indirekt,

durch Kontrast und Form des Sehdings, ein Zusammenhang zwischen Sehschärfe und lichttechnischen Größen. Außerdem erfordern viele praktische Sehaufgaben keine optimale Sehschärfe. Es scheint daher angebracht, eine Kombination von Unterschiedsempfindlichkeit und Formenerkennen zu wählen, indem man das Formenerkennen mit in die Unterschiedsempfindlichkeit einbezieht. Dementsprechend wurde als Kriterium der photometrische Kontrast gewählt, der notwendig ist, um eine einfache Form gegen ihre Umgebung erkennbar zu machen.

Es sind im wesentlichen vier Forscher bzw. Forschergruppen, die sich gegenwärtig besonders mit dem Blendungsproblem befassen. Zwei davon sind in den USA, eine in England und eine in Holland tätig. Einige spezielle Untersuchungen zu diesem Thema werden auch an anderen Stellen, z.B. in Bonn und an der TH in Dresden, durchgeführt. Wenn man das im Bereich der physiologischen Blendung vorliegende Material sichtet, so zeichnen sich hauptsächlich zwei Auffassungen ab:

Die eine geht davon aus, verschiedene Parameter, die im Zusammenhang mit der Blendung von Bedeutung erscheinen, in einer sog. Blendformel zusammenfassen und ihren Einfluß auf die Blendgröße durch geeignete Exponenten festzulegen. Eine derartige Formel stellt die von HARRISON angegebene Beziehung dar:

$$G = c\, B^2\, F \,/\, k\, R^2\, \theta^2 \quad \text{oder umgeschrieben} \quad G = c'\, B\, E_A \,/\, \theta^2$$

G ist eine Größe, die den Grad der Blendung angibt und der oben genannten Unterschiedsempfindlichkeit umgekehrt proportional ist. c ist eine Konstante, B die Leuchtdichte der Blendquelle, F ihre Fläche, R ihr Abstand vom Auge, θ der Blendwinkel (Winkel zwischen den Verbindungsgeraden Auge - Sehobjekt und Auge - Blendquelle) und k ist ein Zahlenwert, der den Adaptationszustand des Auges berücksichtigt, c ist eine Konstante und E_A die Beleuchtungsstärke am Auge.

Der zweiten Auffassung liegt zugrunde, daß alle Sehfunktionen vom Adaptationszustand abhängen. Dieser setzt sich zusammen aus der allgemeinen Adaptation, welche durch die Sehaufgabe und das gesamte Umfeld eingestellt wird und dem Störeinfluß einer oder mehrerer Blendquellen im Gesichtsfeld. Dieser Zusammenhang läßt sich folgendermaßen darstellen: Das Auge adaptiert an eine durchschnittliche Gesichtsfeldleuchtdichte B. Sind keine Störquellen vorhanden, so ist die Adaptations-Leuchtdichte $B_A = B$. Durch die Wirkung einer Blendquelle wird B_A um einen Betrag B_S erhöht. Die Adaptationsleuchtdichte ist nun $B_A^* = B + B_S$. Da der Mindestleuchtdichteunterschied ΔB_{min}, welcher bei sonst unveränderten Versuchsbedingungen wahrnehmbar ist, mit wachsender Adaptationsleuchtdichte größer werden muß, so bedeutet dies, daß ein bei B_A gerade noch erkennbarer Kontrast bei B_A^* unterschwellig, d.h. unsichtbar geworden ist.

B_S wird Schleierleuchtdichte genannt, weil sie bildlich gesprochen einen Lichtschleier über Objekt und Umfelbild auf der Netzhaut legt. B_S hängt in ganz bestimmter Weise von geometrischen und lichttechnischen Daten der Blendquelle ab. Nach HOLLADAY gilt folgender Zusammenhang:

$$B_S = k \cdot 10^4 \cdot B_L \cdot \cos\theta \cdot \omega/\theta^2$$

Es bedeuten: k eine Konstante, B_L = Leuchtdichte der Blendquelle (asb) ; θ = Blendwinkel (rad) und ω = Raumwinkel (sr) der Blendquelle (vom Auge aus gemessen).

Wenn man berücksichtigt, daß

$$B_L \cdot \omega \cdot \cos\theta$$

die Beleuchtungsstärke am Auge ist (parallel zur Pupillenfläche) so ergibt sich

$$B_S = c' \cdot E/\theta^2$$

E ist die Beleuchtungsstärke (lx). Für die Adaptationsleuchtdichte gilt damit:

$$B_A = B_G + c' E/\theta^2$$

Die Blendquelle wirkt also nach dieser Auffassung durch die von ihr erzeugte Beleuchtungsstärke am Auge und durch ihre Lage im Gesichtsfeld. Da sich die Beleuchtungsstärke am Auge auch in der Form

$$E = I \cos \theta / R^2$$

darstellen läßt, wobei R die Entfernung der Blendquelle vom Auge ist, kann man die Wirkung der Störlichtquelle auch durch ihre Lichtstärke I in Richtung auf das Auge, den Lagewinkel und ihren Abstand beschreiben.

Die meisten Autoren bestätigen außerdem die Gültigkeit eines einfachen Additionstheorems, wonach sich die Wirkung mehrerer Störlichtquellen nach ihren Blendgewichten addieren. Die HARRYSON sche Summenformel würde also für mehrere Blendquellen lauten:

$$G = \sum_k^c \frac{B_i \; F_i}{R_i^2 \; \theta_i^2}$$

Die HOLLADAY'sche Formel lautet im entsprechenden Fall:

$$B_A = B_G + k \sum E_i / \theta_i^2$$

Die beiden genannten Beziehungen lassen sich nicht ohne weiteres vergleichen und erst recht nicht ineinander überführen, obwohl gewisse Ähnlichkeiten bestehen. Eine abschließende Diskussion soll aber erst am Ende der vorliegenden Arbeit erfolgen.

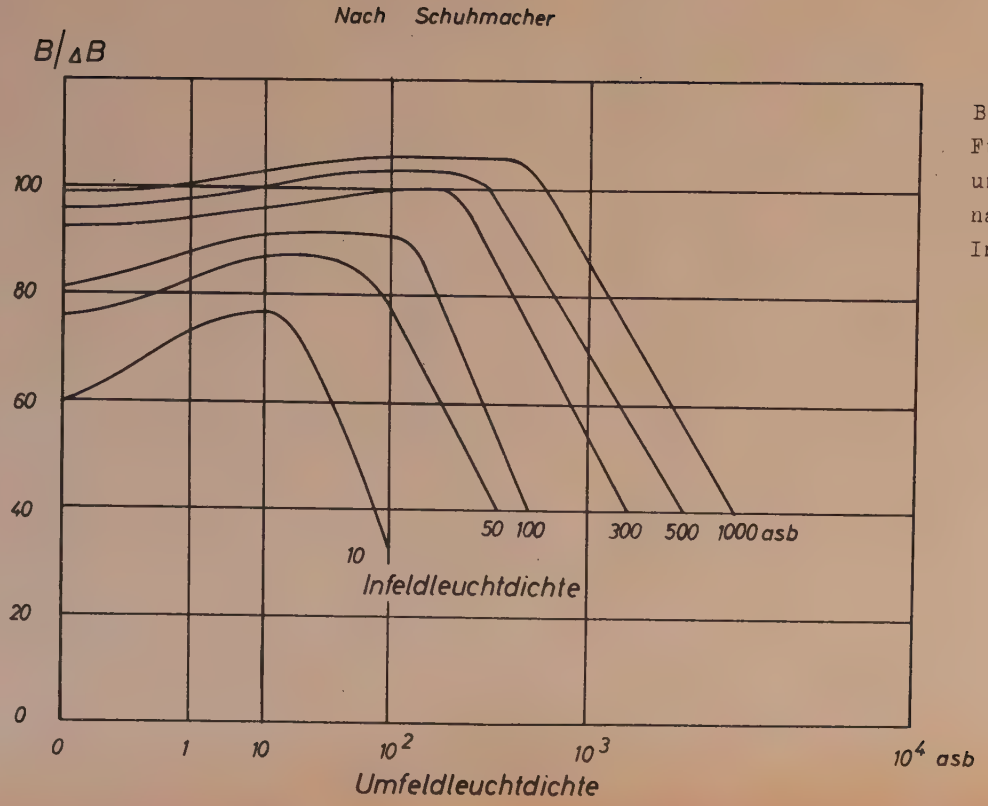


Bild 1. Die UE als Funktion der Umfeld- und Infeldleuchtdichte nach SCHUMACHER. Infeldsehwinkel 20°.

Die Parameter

Zur Klärung der Zusammenhänge wurde versucht, die Messung auf breiter Grundlage durchzuführen, d.h. möglichst alle Größen zu berücksichtigen, die vernünftigerweise einen Einfluß auf die Blendvorgänge haben können. Man wird in erster Linie an die Parameter denken, die in den oben genannten Blendformeln enthalten sind; darüber hinaus kommen aber noch andere Einflüsse in Frage. Leuchtdichte, Fläche, Entfernung vom Auge und Lichtfarbe sind auf seiten der Blendquelle von Bedeutung. Bezüglich des Gesichtsfeldes sind dessen Leuchtdichte und Größe (Adaptationsniveau), seine Farbe und die Lage der Blendquelle, sowie die Art des Meßkriteriums entscheidend.

Darüber hinaus werden auch die Form der Blendquelle und des Gesichtsfeldes, die Beobachtungsart (ein- oder beidäugig) und die Darbietungszeit, sowie die physiologische und psychologische Verfassung der Versuchspersonen gewisse Einflüsse ausüben.

Um die Zahl der Messungen zu begrenzen, die zur Klärung der Zusammenhänge notwendig sind, wurde vorläufig auf eine Untersuchung der Zeitabhängigkeit (wie schon erwähnt) verzichtet, zumal es sich hierbei wesentlich um ein Adaptationsproblem handelt. Außerdem konnte auch die Variation der Umfeldfläche unterbleiben, da eine ausführliche und allgemein anerkannte Arbeit von SCHUMACHER existiert, welche speziell die Umfeldeinflüsse auf die Sehfunktion untersucht (Bild 1 zeigt den Zusammenhang). Der Autor kommt dabei zu dem Ergebnis, daß im Bereich der Leuchtdichte bis 200 asb eine maximale Unterschiedsempfindlichkeit erreicht wird, wenn das gesamte Gesichtsfeld (180°) gleiche Leuchtdichte besitzt. Ist diese in den äußeren Teilen des Gesichtsfeldes (Umfeld) kleiner oder größer, oder wird bei umgleichmäßiger Leuchtdichte der zentrale Teil des Gesichtsfeldes (Infeld) kleiner, so nimmt die Unterschiedsempfindlichkeit ab. Bei höheren Infeldleuchtdichten als 200 asb wird die optimale Unterschiedsempfindlichkeit bei entsprechend kleineren Umfeldleuchtdichten erreicht. Bei Leuchtdichten unter 200 asb führt also eine Vergrößerung des Gesichtsfeldes immer zu einer Steigerung der maxi -

malen Unterschiedsempfindlichkeit. Voraussetzung ist allerdings, daß der Adaptationszustand des Auges durch das In- bzw. Umfeld eingestellt wird; eine Forderung, die gerade bei Blendungsmessungen nicht erfüllt ist. Blendung liegt naturgemäß nur dann vor, wenn die Störlichtquelle den Adaptationszustand wesentlich beeinflußt. In diesem Fall ist aber eine Veränderung der Infeldfläche entsprechend weniger wirksam. Der relative Verlauf der Kurven bleibt, wie ARNDT und SCHUMACHER gezeigt haben, in allen Fällen unverändert. SCHÖNWALD kommt bei der Ermittlung der Unterschiedsempfindlichkeit für Punktreize (0,1 - 10') zu der Feststellung, daß die Umfeldgröße zwischen 3,5 und 40° bei Leuchtdichten zwischen 0,03 und 2 asb keinen Einfluß auf die Unterschiedsempfindlichkeit hat. Die Frage des Umfeldes wird bei der Besprechung der Meßergebnisse noch eingehend erörtert werden. Über Zusammenhänge zwischen den übrigen genannten Größen berichtet diese Arbeit.

Das Kriterium

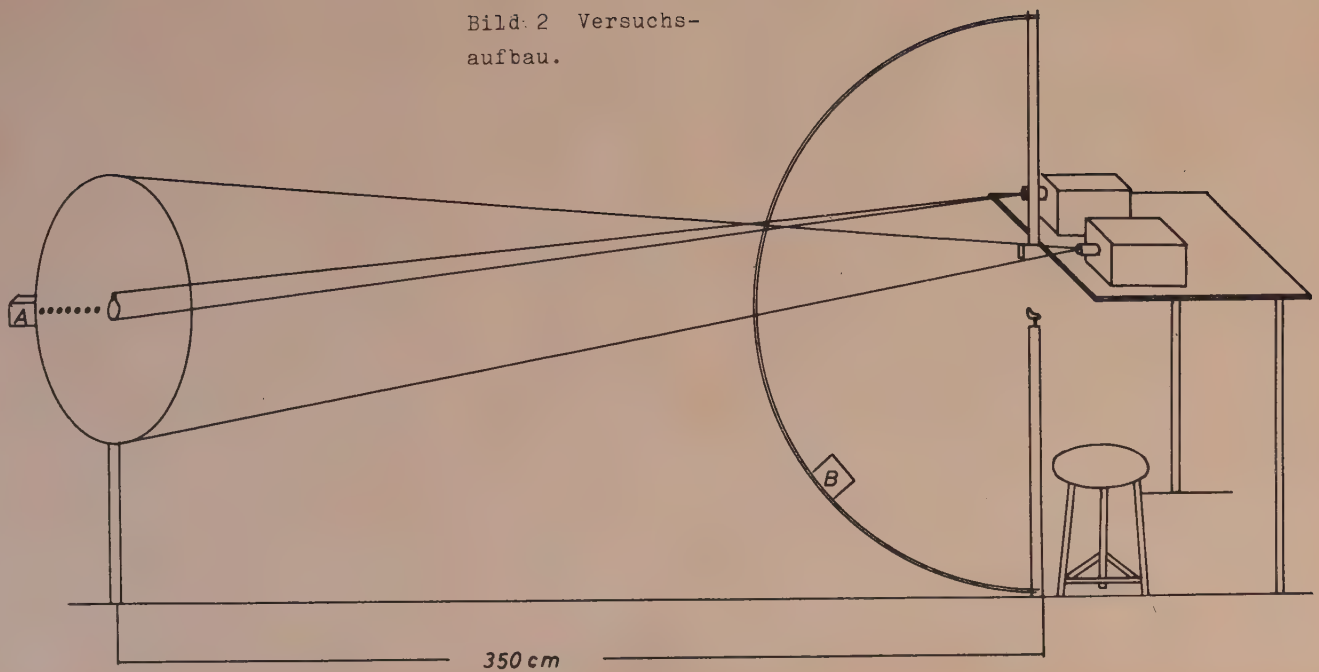
Wie entsprechende Vorversuche zeigten, ist der relative Verlauf der Unterschiedsempfindlichkeit unabhängig davon, ob man von einer vorgegebenen Grundfläche eine Kreisfläche bekannter Lage und Größe als Leuchtdichteunterschied darbietet, oder ob man an diesem Prüffleck noch eine Nase anbringt und die Angabe ihrer Stellung verlangt. Im ersten Fall handelt es sich um die Ermittlung der reinen Unterschiedsempfindlichkeit, während im zweiten Fall das Formenerkennen mit einbezogen wird. Die reine Unterschiedsempfindlichkeit liefert, auf gleiche Aussagewahrscheinlichkeit bezogen, etwa 20 - 25 % höhere Werte. Das Formenerkennen setzt eine einwandfreie Wahrnehmung des Leuchtdichteunterschiedes zwischen Infeld und Prüffleck voraus und ermöglicht die genaue Einstellung eines leicht überschwelligen Kontrastes. Darüberhinaus zwingt der Formentest in der verwendeten Art zum fovealen Sehen, da extrafoveal die Sehschärfe nicht mehr ausreicht, die Naseneinstellung zu erkennen, obwohl die reine Unterschiedsempfind-

lichkeit, besonders bei kleinen Blendwinkeln und Abwendung des Blickes, extrafoveal höher ist. Diese Fixierung der Blickrichtung ist wegen der starken Winkelabhängigkeit der Blendung besonders wichtig. Als Testzeichen wurde das Innere eines LANDOLT'schen Ringes benutzt, welcher international für Sehschärfemessungen anerkannt ist. Der Prüffleck war dementsprechend eine Kreisfläche mit einer quadratischen Nase, wobei die Nasenbreite 1/4 des Kreisdurchmessers betrug. Die Nase konnte im Uhrzeigersinn gedreht und in jede beliebige Stellung gebracht werden. Der Test wurde so groß dargeboten, daß er einem LANDOLT'schen Ring für die Sehschärfe 1/15 entsprach.

Die Versuchspersonen

Die Messungen wurden mit einem Normalbeobachter und bis zu 15 zusätzlichen Testpersonen durchgeführt. Der Normalbeobachter (weiblich, 22 Jahre) wurde aus einem Kreis von etwa 30 Personen nach physiologisch-optischen Gesichtspunkten ausgewählt. Geprüft wurden Sehschärfe, Heterophorie, Raumsehen, Farbtüchtigkeit und Adaptation. Der Normalbeobachter hat sich bei allen Proben als voll sehtüchtig erwiesen, und war auch sonst in jeder Beziehung (Konzentrationsfähigkeit, Ausdauer, Reproduzierbarkeit von Meßwerten, geistige Beweglichkeit und Interesse an der Sache) bestens geeignet. Gemessen wurde grundsätzlich mit dieser Testperson, wobei die wesentlichen Zusammenhänge mit den anderen Beobachtern kontrolliert wurden. Diese Personen, männlich und weiblich, waren 19 - 35 Jahre alt und voll sehtüchtig, wenngleich sie nicht alle die Werte des Normalbeobachters erreichten. Brillenträger, Farbenfehlsichtige und Personen mit Heterophorie oder Astigmatismus wurden ausgeschlossen. Auf den Einfluß der Brille bei Blendung wird später noch kurz eingegangen. Farbfehlsichtige konnten zur Messung der Blendung bei farbigem Licht nicht verwendet werden. Eine Heterophorie erschwert das Auffinden des Prüfflecks und der Astigmatismus das gleichmäßige Erkennen der Nasenstellung.

Bild 2 Versuchs-
aufbau.



Der Versuchsaufbau

Die Untersuchungen wurden mit einer Ausnahme (Entfernungsabhängigkeit) in einem Raum von 5 m mal 4,5 m Grundfläche durchgeführt. Die Versuchsanordnung entsprach der Darstellung von Bild 2. Ein Stahlrohr, das zwischen Fußboden und Decke eingespannt war, trug in geeigneter Höhe eine Kinn- und Stirnstütze. Um dieses Rohr als Achse war ein halbkreisförmig gebogenes Rohr schwenkbar angeordnet. Auf letzterem konnten mehrere Blendquellen verschiebbar angebracht werden. Der Radius des Bogens betrug 125 cm, der Abstand der Lichtquelle von der Nasenwurzel des Beobachters 100 - 115 cm. Diese Vorrichtung, die etwa einem überdimensionalen Perimeter entsprach, war von einem Gehäuse umgeben (in Bild 2 weggelassen), das innen mit schwarzem Velourpapier ausgeschlagen war. Damit konnte Streulicht von der Testtafel ferngehalten werden. Mit dieser Anordnung war es möglich, Blendquellen an jede Stelle des Gesichtsfeldes zu bringen. 350 cm von der Kinnstütze entfernt war eine Testtafel von 1 m Durchmesser aufgestellt. Diese war mit Plakaweiß gestrichen und stellte das Grundadaptationsfeld dar, das im folgenden mit Infeld oder Testfeld bezeichnet wird. Dieses Feld hatte, vom Auge des Beobachters aus gesehen, eine Ausdehnung von etwa 16° (Sehwinkel). Das Umfeld, gebildet durch einen schwarzen Velourvorhang hinter der Testtafel und durch das schwarze Innere des Perimetergehäuses, war dunkel. Unmittelbar über dem Kopf der Versuchspersonen standen zwei Projektoren. Durch eine geeignete Öffnung in der Umgebung, die auch der Testperson den Blick auf das Infeld freigab, wurde dieses von einem Projektor ausgeleuchtet. Die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung betrug 1 : 1,1. Der zweite Bildwerfer projizierte auf die Mitte des Infeldes den Prüffleck. Dieser hatte (ohne Nase) einen Durchmesser von 6 cm, entsprechend einem Sehwinkel von 1° (mit Nase 7,5 cm, entsprechend $1{,}2^{\circ}$). Diese Prüffleckgröße wurde gewählt, weil ein größerer Testfleck die Blickrichtung (speziell für die Messung der Winkelabhängigkeit) nicht genügend fixiert. Außerdem hat ARNDT ge-

zeigt, daß die Unterschiedsempfindlichkeit für Sehobjekte, die unter einem Winkel von weniger als 1° erscheinen, sehr stark vom Sehwinkel (d.h. von der scheinbaren Größe) abhängt und mit abnehmendem Winkel kleiner wird. Eine Winkelausdehnung des Prüffleckes von etwa 1° ist daher zweckmäßig. Auch der Abstand der Testtafel vom Beobachter (350 cm) wurde nicht willkürlich gewählt. BOUMA hat untersucht, wieweit die Sehschärfe des menschlichen Auges von der Entfernung abhängt. Er ist dabei zu der Feststellung gekommen, daß die Sehschärfe in einer Entfernung von etwa 3 - 5 m optimal ist. Im vorliegenden Fall wird zwar nicht die Sehschärfe als Kriterium verwendet, es erscheint aber wegen des früher erwähnten Zusammenhanges zwischen den Grundsehfunktionen zweckmäßig, dieses Ergebnis zu berücksichtigen.

Der Versuchsaufbau war elektrisch mit einem Meßtisch verbunden. Von hier aus konnten die Lichtströme der beiden Projektoren (für Infeld und Prüffleck) kontinuierlich verändert werden. In jedem Projektor war ein Photoelement eingebaut, das einen Teil-Lichtstrom empfing und dessen elektrischer Strom an einem mA-Meter abgelesen werden konnte. Nach entsprechender Eichung war es also möglich, die Leuchtdichte des Testfeldes bzw. des Prüfflecks am Meßtisch abzulesen. Außerdem konnte von dort aus der Prüffleck abgedeckt, die Prüfflecknase verdreht und ihre Stellung abgelesen werden. Es war auch möglich, vom Meßplatz aus die Leuchtdichten der Blendquellen stetig zu verändern. Die gesamte Stromversorgung kam vom Netz und wurde über einen 2-KW-Stabilisator konstant gehalten. Zur Erzeugung hoher Testfeldleuchtdichten wurden bis zu sechs Nitraphotlampen mit je 500 Watt und eine 10 KW-Glühlampe mit Reflektor verwendet. So war es möglich, die Testfeldleuchtdichte in einem Bereich von 0,03 asb - 30 000 asb zu variieren. Die Mindestleuchtdichte von 0,03 asb war dadurch bestimmt, daß der durch die Blendquelle hervorgerufene Streulichtanteil, der sich beim Lagewechsel verändert, im Maximum nicht mehr als 10 % der Testfeldleuchtdichte betragen sollte. Die zusätzliche Leuchtdichte des Prüf-

flecks konnte im Bereich von 0 - 300 asb verändert werden, was für alle Messungen ausreichend war. Um einerseits keine zu große Veränderung der Lichtfarbe in Kauf zu nehmen und andererseits den Einstell- und Meßbereich zu dehnen, wurden die Lichtstärken der Projektoren und die Leuchtdichten der Blendquellen durch geeignete Neutralfilter bekannter Transparenz grob eingestellt und durch Verkleinerung der Soll-Stromstärke auf den entsprechenden Wert eingestellt. Es wurden Stromänderungen < 10 % zugelassen, entsprechend einer Farbtemperaturänderung von etwa 3 700 - 3 300° K. Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich, daß eine Änderung der Lichtfarbe keinen Einfluß auf den Blendvorgang hat. Es ist also ohne weiteres zulässig, die Farbtemperatur der verwendeten Lichtquellen zu verändern. Es wurde aber trotzdem auf eine starke Veränderung der Lichtfarbe verzichtet, um das Moment des Farbkontrastes auszuschalten. Mit der elektrischen Regelung der Leuchtdichten hat man den Vorteil, sehr schnell und genau einstellen zu können. Da der Lichtstrom aller Lichtquellen eine Funktion der Brennstunden ist, wurden häufig Kontroll- und Eichmessungen durchgeführt. Die Eichmessungen stützen sich auf das Universal-Photometer von Schmidt und Haensch mit Leuchtdichtenormal und den Beleuchtungsstärkemesser von Gossen.

Blendquellen

Es wurden vier verschiedene Blendquellen verwendet. Als Punktlichtquelle diente eine 50 W-Schmalfilm-Projektionslampe mit Reflektor. Die mittlere Leuchtdichte betrug 2 000 cd/cm^2, die Lichtstärke 900 cd. Der wirksame Durchmesser ist also ungefähr 7,5 mm in guter Übereinstimmung mit dem visuellen Eindruck. Die Farbtemperatur betrug im Mittel 3 200° K. Diese Lichtquelle wurde für große Blendwinkel zwischen 10 und 90° am Perimeterbogen angebracht, für kleinere Blendwinkel zwischen 1,5 und 7° durch Löcher in der Testscheibe (Infeld) dargeboten. Die nicht benutzten Öffnungen waren jeweils durch Stöpsel verschlossen, um zu-

sätzliche Störungen im Gesichtsfeld zu vermeiden.

Zur Untersuchung der Flächenwirkung wurde eine Blendquelle verwendet, die einen Durchmesser von 85 mm hatte. Die leuchtende Fläche war eine Opalglasscheibe (Überfangglas), die durch vier 45 Watt-Niedervolt-Lampen gleichmäßig ausgeleuchtet wurde. Vor dieser Opalglasscheibe war eine Irisblende angebracht, die eine stetige Verkleinerung der Fläche ermöglichte. Die Konstanz der Leuchtdichte über die Fläche war so groß, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit die Beziehung $E = \pi B \sin^2 u$ für die praktisch verwendeten Öffnungswinkel bis 5° erfüllt war. Die strenge Formel $E = \pi .B. \sin^2 u$ geht wegen $\omega = 4 \sin^2 u/2$ für kleine Winkel u in $E = B. \omega$ über. Es ist dann wegen $\omega = \frac{F}{R^2}$ bei konstantem R und B, $E \sim F$. Es bedeuten E Beleuchtungsstärke, B Leuchtdichte, u halber Öffnungswinkel, ω Raumwinkel, F Fläche, R Radius. Die Leuchtdichte dieser Blendquelle betrug maximal 3 sb, ihre Lichtstärke 170 cd.

Zur Untersuchung der Flächenabhängigkeit bei großen Flächen wurde eine konzentrische Anordnung von drei ringförmigen Leuchtstofflampen benutzt, die mit einem Überfangglas von 45 cm Durchmesser abgedeckt waren. Durch geeignete Anstriche und Montage konnte auch hier weitgehend konstante Leuchtdichte erzielt werden und wegen der guten Annäherung an den Lambert-Strahler wurde keine merkliche Abweichung von der Beziehung $E = \pi B \sin^2 u$ gefunden, obwohl Öffnungswinkel bis 24° benutzt wurden. Für große Winkel besteht allerdings keine Proportionalität zwischen Fläche und Beleuchtungsstärke. Die Leuchtdichte betrug 0,3 sb, die Lichtstärke 460 cd.

Darüber hinaus wurden für spezielle Untersuchungen (Additionstheorem der Blendung) Nitraphotlampen in verschiedenen Abständen und Anordnungen und mit verschiedenen Leuchtdichten benutzt. Die mittlere maximale Leuchtdichte dieser Lampen betrug 30 sb und 70 sb, ihre Lichtstärke 2 250 cd, ihre Farbtemperaturen

3 000° K und 3 400° K. Die Leuchtdichten der Blendquellen (ausgenommen diejenigen mit 45 cm Durchmesser) konnten durch Vorsetzen geeigneter Neutralfilter (Schott) verringert werden. Ebenso wurden zur Erzeugung farbigen Blendlichtes Farbgläser der Firma Schott verwendet. Die lichttechnischen Daten der Blendquellen wurden regelmäßig kontrolliert und richtiggestellt.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der verwendeten Testfeldleuchtdichten und der Beleuchtungsstärken, die das Testfeld am Auge in einem Abstand von 350 cm erzeugt. In Tabelle 2 sind die benutzten Blendquellen sowie ihre lichttechnischen und geometrischen Daten aufgeführt.

Die Meßbedingungen

Während die Versuchsanlage eingebrannt, die Ausgangswerte eingestellt und kontrolliert wurden (Leuchtdichtemesser, Luxmeter) setzte sich die Versuchsperson bequem an den Testplatz und hatte ausreichend Zeit, ihre Adaptation optimal einzustellen. Diese Anpassung dauerte verschieden lang, je nachdem wie groß der Unterschied zwischen dem durchschnittlichen Beleuchtungsniveau am ursprünglichen Aufenthaltsort der Testperson und in der Meßanordnung war. Da bei Blendungsmessungen naturgemäß eine gewisse Beleuchtungsstärke auf dem Auge der Versuchsperson vorhanden ist, genügt es im allgemeinen 10 bis 15 Minuten zu adaptieren. Für Schwellenmessungen muß in völliger Dunkelheit die Adaptationszeit allerdings mindestens 40 Minuten (95 % des 1-Stundenwertes) betragen. Um optimale, möglichst gleichwertige Meßergebnisse zu erhalten, wurde nur in den Vormittagsstunden gemessen, wo angenommen werden konnte, daß sich die Versuchspersonen im ausgeruhten und leistungsfähigen Zustand befanden. Um Ermüdungserscheinungen und damit ein Nachlassen der Konzentration zu vermeiden, waren die Messungen so angelegt, daß eine Zeit von 30 Minuten für eine Meß-

Tabelle 1

Leuchtdichte des Test- oder Infeldes B (asb) gemessen	Beleuchtungsstärke E (lx) die das Testfeld am Auge erzeugt	Sehwinkel für das Testfeld
0,03	$6 \cdot 10^{-4}$	16^{o}
0,3	$6 \cdot 10^{-3}$	
3	$6 \cdot 10^{-2}$	
30	0,6	
300	6	
3 000	60	
30 000	600	

Tabelle 2

Blendquelle	B (sb) max. gem.	E (lx) Auge max. gem.	Sehwinkel etwa	wirksamer c Ø (cm)	R (cm)	I (cd) max. gerechnet
Autolampen	3,2	120	4^{o}	8,5	120	170
Leuchtstoff-lampen	0,3	420	24^{o}	45	105	460
Punktlicht-quelle	2 000	70	5'	0,75	350	860
Nitraphot-lampen	30	1 000	4^{o}	11	165	2700
Nitraphotlampen	70	1000	$2,5^{o}$	7	165	2700

reihe nicht überschritten wurde. Die Erfahrung zeigt, daß dies für nicht geübte Versuchspersonen die äußerste Grenze für zuverlässige (reproduzierbare) Messungen war. Der geübte Normalbeobachter hat in Ausnahmefällen auch eine Stunde konzentriert gearbeitet. Es wurden nie mehr als zwei Meßreihen mit einer Testperson an einem Tag durchgeführt. Auch hier machte einzig der Normalbeobachter eine Ausnahme, indem mit ihm dreimal, selten auch viermal, am Tag gemessen wurde. Es ist ferner immer darauf geachtet worden, daß innerhalb einer Meßreihe von großen zu kleinen Blendwinkeln, von kleinen zu großen Leuchtdichten, von kleinen zu großen Blendflächen, allgemein von kleinen zu großen Beleuchtungsstärken am Auge fortgeschritten wurde. Das verkürzt die Zeit für eine Meßreihe, weil die Adaptation in Richtung größerer Helligkeit schneller abläuft, als umgekehrt. Die Leuchtdichte des Prüfflecks wurde ebenfalls von niederen zu höheren Leuchtdichten geregelt, obwohl hier grundsätzlich auch der umgekehrte Weg möglich wäre. Bei dem gewählten Kriterium ergab sich kein Unterschied zwischen beiden Möglichkeiten. Benützt man als Kriterium die reine Unterschiedsempfindlichkeit (also den Prüffleck ohne Nase), so zeigt sich eine, wahrscheinlich psychologisch bedingte, Hysterese derart, daß die Versuchsperson den Prüffleck auch dann noch wahrzunehmen glaubt, wenn er abgedeckt ist. Auch diese Erscheinung spricht für die Wahl der kombinierten Meßgröße.

Meßvorgang und Aussagewahrscheinlichkeit

Die Versuchsperson (die durch Kinn- und Stirnstütze fixiert war), wurde einer bestimmten Blendsituation ausgesetzt und ihre Anpassung entsprechend der Erfahrung abgewartet. Anschließend wurde die Leuchtdichte des Prüfflecks von unterschwelligen Werten kommend, in kleinen nicht wahrnehmbaren Schritten gesteigert. Der Prüffleck, der bei jeder Änderung (sowohl der Leuchtdichte als auch der Nasenstellung) abgedunkelt war, wurde nach jedem Schritt erneut dargeboten, wobei die Zeit zwischen Dunkelheit

und voller Leuchtdichte des Testflecks 0,1 s war. Bezüglich der Erkennbarkeit spielt der zeitliche Leuchtdichteanstieg eine gewisse Rolle. Allzu langsame Änderungen erschweren das Erkennen. Die Darbietungszeit betrug maximal 10 s; erfolgt innerhalb dieser Zeit keine Angabe, so galt die Einstellung als nicht erkannt. Längere Darbietungszeiten verbesserten das Ergebnis nicht merklich. Die Versuchspersonen wurden dazu angehalten, auch dann eine Aussage über die Stellung der Nase zu machen, wenn sie ihre Angaben für sehr unzuverlässig hielten. Konnte eine Nasenstellung richtig erkannt werden, so wurde diese Leuchtdichteeinstellung beibehalten und mit veränderter Nasenstellung geprüft.

Um nun die Frage der Wahrscheinlichkeit zu untersuchen, mit der eine Stellung erraten werden kann, muß näher auf die Einstellmöglichkeiten und ihre Gleichwertigkeit eingegangen werden. Es ist ohne weiteres verständlich, daß sich besonders bei kleinen Blendwinkeln ein Unterschied in der Erkennbarkeit der Nasenstellung ergibt, je nachdem, ob diese der Blendquelle zu oder abgewendet ist. Voruntersuchungen zur Klärung dieses Problems zeigten, daß nur für Blendwinkel $>10^{\circ}$ kein meßbarer Zusammenhang zwischen Nasenstellung und Erkennbarkeit besteht. Im Verlauf der weiteren Untersuchungen wird sich zeigen, daß dieses Ergebnis ganz folgerichtig ist. Diese Erscheinung hat zur Folge, daß im Bereich kleiner Blendwinkel nur mit zwei symmetrischen Nasenstellungen, zum Beispiel für links liegende Blendquellen mit "oben" und "unten" gearbeitet werden konnte. Damit beträgt die Wahrscheinlichkeit, die richtige Stellung zu erraten, 0,5 und die Messung muß zur Steigerung der Zuverlässigkeit entsprechend oft wiederholt werden. Um wenigstens bei den großen Blendwinkeln die Meßzeiten abzukürzen, wurde hier die allgemein geläufige Zwölf - Stunden - Einteilung der Uhr für die Stellungen der Prüfflecknase zugrunde gelegt. Allerdings zeigt sich hier eine Schwierigkeit. Wegen der fehlenden Vergleichsmöglichkeit (Zifferblatt und der Dicke des

Zeigers) konnte an der Schwelle zwar die Stellung erkannt werden, aber es war keine zuverlässige Angabe möglich, ob die Anzeige z.B. "1 Uhr" oder "2 Uhr " entsprach. Es mußte also eine Unsicherheit von einer Stunde in Kauf genommen werden. Andererseits sollte die Teilung nicht zu grob sein, um die Ratewahrscheinlichkeit und damit die Meßzeit klein zu halten. Aus diesem Grunde wurde eine Fehlangabe von $\pm$ 1 Stunde als richtig gewertet, wenn die Aufforderung zur Korrektur die wahre Zeigerstellung ergab, wobei diese nicht geändert wurde. Beispiel: Die Einstellung entspricht "3 Uhr", die Angabe der Versuchsperson lautet "2 Uhr", die Versuchsperson wird durch das Stichwort "oder" zur Korrektur aufgefordert und gibt an "1 Uhr". Die Stellung gilt als nicht erkannt. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Versuchsperson die Einstellung nach diesem System errät, ist 1/6. Die Wahrscheinlichkeit genau den richtigen Wert zu erraten ist 1/12. Die Wahrscheinlichkeit den richtigen Wert $\pm$ 1 Stunde zu erraten ist 2/12; die Wahrscheinlichkeit die dann folgende Alternative richtig zu treffen ist 1/2 und das Produkt 1/12. Die Wahrscheinlichkeit entweder direkt oder auf dem genannten Umweg den richtigen Wert zu erraten ist $1/12 + 1/12 = 1/6$. Werden für zwei aufeinanderfolgende Messungen nach diesem System zwei richtige Angaben verlangt, so ist die Wahrscheinlichkeit beide Stellungen richtig zu raten $(1/6)^2 = 1/36$ entsprechend 2,8 %. Bei kleinen Blendwinkeln mit nur zwei Nasenstellungen wurden sechs aufeinanderfolgende richtige Angaben verlangt. Die Wahrscheinlichkeit dabei sechs aufeinanderfolgende Stellungen richtig zu raten ist $(1/2)^6 = 1/64$ entsprechend 1,6 %. Es ist nicht ratsam, die Ratequote weiter herabzusetzen, da die verlängerte Meßzeit wachsende Fehler durch die Ermüdung der Versuchsperson zur Folge hätte.

Bei jeder falschen Angabe wurde der Kontrast um einen untermerklichen Wert erhöht und die Messung wiederholt, bis bei kleinen Blendwinkeln 6, bei größeren Blendwinkeln 2, aufeinanderfolgende richtige Angaben gemacht wurden. Dann erst wurde eine

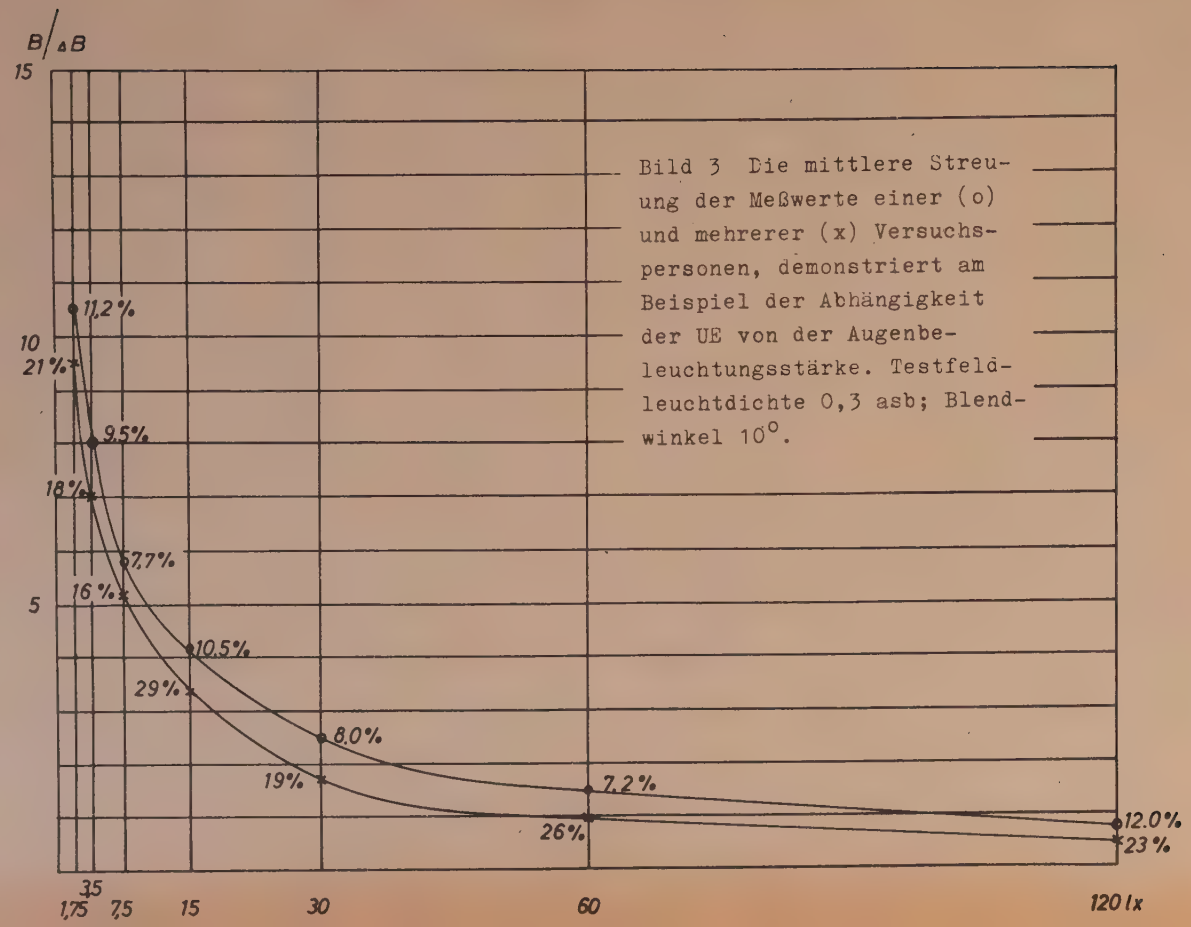


Bild 3 Die mittlere Streuung der Meßwerte einer (o) und mehrerer (x) Versuchspersonen, demonstriert am Beispiel der Abhängigkeit der UE von der Augenbeleuchtungsstärke. Testfeldleuchtdichte 0,3 asb; Blendwinkel 10^{o}.

neue Blendsituation eingestellt und der Meßvorgang wiederholt. Grobe Änderungen des Adaptationsniveaus wurden im allgemeinen vermieden; waren sie nicht zu umgehen, so musste auch innerhalb einer Meßreihe eine entsprechende Anpassungszeit abgewartet werden.

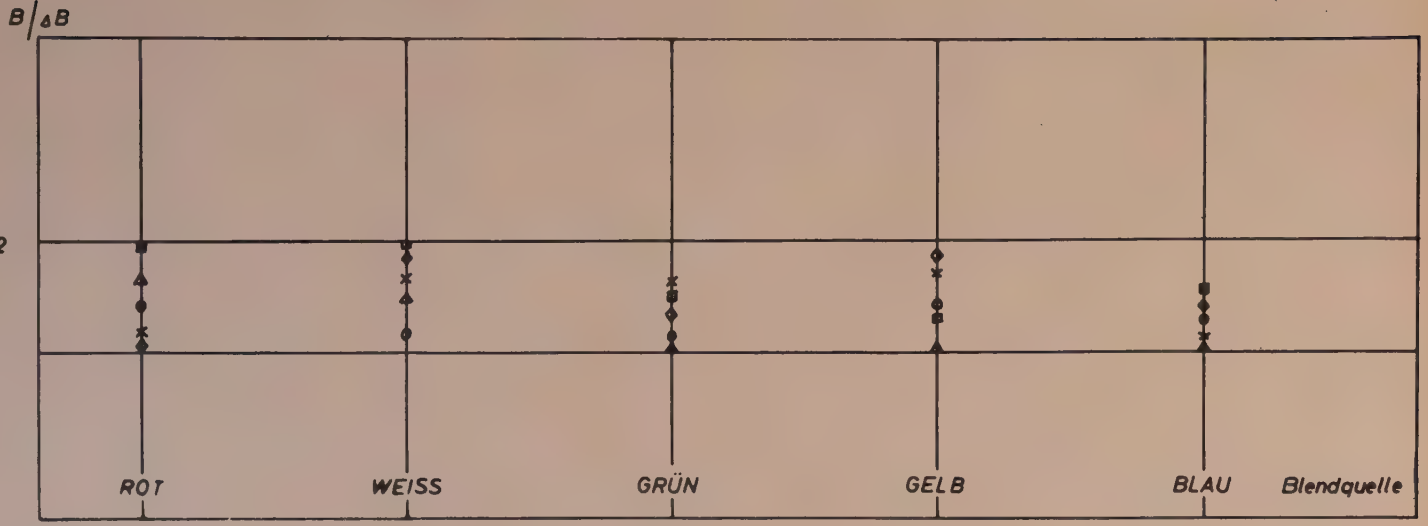
Meßgenauigkeit

Wie schon in der Einleitung angedeutet, ist es besonders bei physiologischer Blendung wichtig, die Meßgenauigkeit und die allgemeine Anwendbarkeit der Ergebnisse zu prüfen. Biologisch-psychologische Einflüsse sind nie vollständig zu berechnen oder zu kontrollieren. Man hat also in jeder derartigen Messung Parameter, deren willkürliche Änderung den mittleren Fehler der Meßwerte gegenüber den rein physiologisch bedingten Fehlern beträchtlich erhöhen. Im folgenden soll an einem typischen Beispiel gezeigt werden, wie groß bei den anschließend besprochenen Messungen die Fehler sind und inwieweit man die mit dem Normalbeobachter gewonnenen Ergebnisse auf ein Kollektiv anwenden kann. Bild 3 zeigt die Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit von der Beleuchtungsstärke am Auge bei einer Infeldleuchtdichte von 0,3 asb und einem Blendwinkel von 10° horizontal und 0° vertikal. Die Kurvenpunkte der beiden Kurven sind Mittelwerte aus je 10 Messungen. Die Kreise (obere Kurve) wurden nur mit dem Normalbeobachter ermittelt, die Kreuze (untere Kurve) mit 10 verschiedenen Versuchspersonen zwischen 20 und 35 Jahren. Die an die Kurvenpunkte angeschriebenen Prozentzahlen geben die mittleren Fehler der $B/\Delta B$-Werte an. Es wurde in bekannter Weise der mittlere Fehler der Meßgröße ΔB errechnet und nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz auf $B/\Delta B$ übertragen. Es gilt für konstante Infeldleuchtdichte

$$B \frac{\partial}{\partial \Delta B} \left(\frac{B}{\Delta B} \right) \mu_{\Delta B} = - \frac{B \cdot \mu_{\Delta B}}{\Delta B^2}$$

wobei $\mu_{\Delta B}$ der mittlere Fehler der ΔB-Werte ist. In Prozenten ausgedrückt ergibt sich

Bild 4 Unter den Farben Rot, Grün, Gelb, Blau und "Weiß" gibt es keine Farbkombination für Blendlicht und Testfeld, die sich bezüglich der UE bei physiologischer, statischer Blendung aus den übrigen hervorhebt.



$$\mu_{B/\Delta B}(\%) = \frac{100\ B/\Delta B^2}{B/\Delta B} \cdot \mu_{\Delta B} = \frac{100}{\Delta B}\,\mu_{\Delta B}$$

das heißt, der prozentuale mittlere Fehler der Funktion B/ Δ B ist zahlenmäßig gleich dem prozentualen mittleren Fehler der B-Werte. Es zeigt sich, daß der mittlere Fehler der Messungen mit dem Normalbeobachter nur etwa halb so groß ist ~~als~~ wie bei den Messungen mit dem Kollektiv. Der mittlere Fehler der B/ Δ B-Werte ist von der Art der Messung (Blendwinkel, Beleuchtungsstärke am Auge usw.) weitgehend unabhängig, wenn man die schnellere Ermüdung bei starker Blendung berücksichtigt. Insbesondere bleibt das Verhältnis des mittleren Fehlers von Normalbeobachter und Kollektiv erhalten, ebenso die relative Lage entsprechender Kurven. Das herausgegriffene Beispiel stellt eine durchschnittliche Messung dar und zeigt den prozentualen mittleren Fehler, mit dem Messungen des Normalbeobachters bzw. des Kollektivs behaftet sind. Alle im folgenden dargestellten Kurven bzw. Kurvenpunkte sind Mittelwerte aus mehreren Messungen mit dem Normalbeobachter.

Durchführung der Versuche und Ergebnisse

1) Einfluß der Lichtfarbe

Die erste Untersuchung galt der Farbabhängigkeit der Blendung. Zu diesem Zweck wurde Glühlampenlicht durch geeignete Gläser gefiltert. Es wurden die Schott-Filter RG 1, VG 9, GG 14, BG 7 benützt, entsprechend den Farben Rot, Grün, Gelb, Blau und "Weiß" (ungefiltert). Sowohl das Blendlicht als auch Infeld und Prüffleck wurden farbig dargeboten, wobei Infeld und Prüffleck gleichfarbig waren. Letzteres war notwendig, da sonst statt des Leuchtdichtekontrastes der Farbkontrast die Erkennbarkeit des Prüfflecks bestimmt hätte. Die Farben des Blendlichtes und des Infeldes mit Prüffleck wurden so permutiert, daß alle möglichen Farbkombinationen vorkamen. Bild 4 zeigt für einen speziellen Fall das Ergebnis. Die Leuchtdichte der

Blendquelle war für alle Meßpunkte 200 sb, entsprechend einer Beleuchtungsstärke am Auge von 7 lx. Der Blendwinkel war 2^{o}, die Infeldleuchtdichte 50 asb, entsprechend einer Beleuchtungsstärke am Auge von 1 lx. Kleinere Infeldleuchtdichten wurden wegen des PURKINJE'schen Phänomens nicht verwendet. Die Meßpunkte sind Durchschnittswerte aus je 5 Messungen. Die Streubreite des Durchschnittswertes entspricht der beschränkten Zahl von Messungen und der Tatsache, daß es sich um ein heterochromes Problem handelt. Entscheidend ist aber, daß keine Zuordnung einer bestimmten Lichtfarbe zu besonders hohen oder niedrigen B/ΔB-Werten zu erkennen ist, d.h. daß sich keine Farbkombination aus den übrigen hervorhebt. Entsprechende Messungen unter anderen Bedingungen (größere Blendwinkel, größere Testfeldleuchtdichte) zeigten das gleiche Ergebnis. Eine spezielle Untersuchung galt der Frage, ob Gelblicht an Kraftfahrzeugen eine geringere Blendgefahr darstellt als "weißes" Licht. Bild 5 zeigt für ein weißes Infeld B = 3 asb, E_{Auge} = 6.10^{-2} lx und weißen Prüffleck die Unterschiedsempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Blendwinkel bei einer Blendquellenleuchtdichte von 3 sb, was bei einem Öffnungswinkel von 4 Grad eine Beleuchtungsstärke am Auge von 120 lx ergab. Die Blendquelle wurde weiß X, "Autogelb" (GG 5) o und in gesättigtem Gelb (GG 14)□ dargeboten. Auch in diesem Fall läßt sich kein Vorteil des gelben Lichtes erkennen. Messungen mit kleinerem Öffnungswinkel der Blendquelle und kleineren Augenbeleuchtungsstärken zeigten das entsprechende Ergebnis. Aus diesen Versuchen ist der Schluß zu ziehen, daß sich farbiges Licht bezüglich der statischen, physiologischen Blendung und bezüglich des gewählten Kriteriums nicht von "weißem" Licht unterscheidet. Zum gleichen Ergebnis sind STILES und HOLLADAY, sowie KLEIN, WEIGEL und ARNDT gekommen. Darüber hinaus ist offenbar auch die Farbe des Testfeldes ohne Bedeutung, solange man sich im Bereich des überwiegenden Zapfensehens befindet.

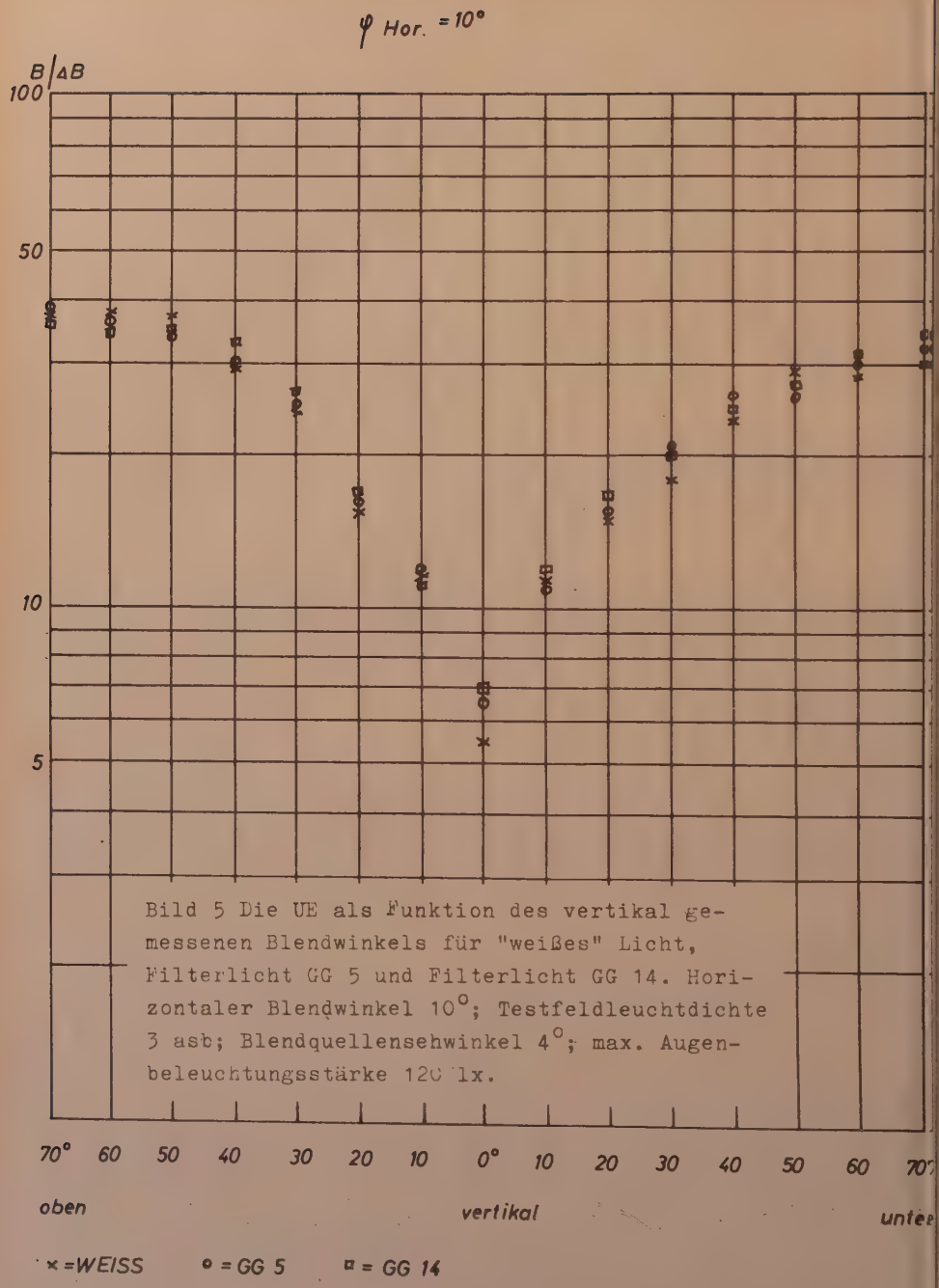


Bild 5 Die UE als Funktion des vertikal gemessenen Blendwinkels für "weißes" Licht, Filterlicht GG 5 und Filterlicht GG 14. Horizontaler Blendwinkel 10°; Testfeldleuchtdichte 3 asb; Blendquellensehwinkel 4°; max. Augenbeleuchtungsstärke 120 lx.

2) Einfluß der Lage der Blendquelle im Gesichtsfeld

Es ist eine heute noch umstrittene Frage, ob bei festem Blendwinkel die spezielle Lage der Störlichtquelle, d.h. oben, unten, rechts oder links unterschiedliche Blendwirkung ergibt. Seitliche Lagen können sich wegen der äußeren und inneren anatomischen Symmetrie bei beidäugiger Beobachtung im Normalfall nicht verschieden auswirken. Bezüglich der Lage "oben" und "unten" ergeben sich allerdings geringe Unterschiede. Das oben schon beschriebene Bild 5 zeigt den Verlauf der Unterschiedsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der vertikalen Winkellage der Blendquelle; dabei wurde ein horizontaler Winkel von 10° gewählt, da eine durch die Sehrichtung verlaufende Verschiebung den Prüffleck verdecken würde. Es ist deutlich zu erkennen, daß offenbar bis zu einem Winkel von 20° weitgehende Symmetrie besteht und daß bei größeren Winkeln die oben liegende Blendquelle höhere Werte der Unterschiedsempfindlichkeit ergibt (d.h. weniger blendet) als die entsprechende untere Lage. Der Unterschied ist aber offenbar gering und interindividuell starken Schwankungen unterworfen. Der Verdacht, daß es sich hierbei um Abschattung durch die Wimpern handelt, ist durch entsprechende Messungen bestätigt worden. An zwanzig Versuchspersonen wurden bei geringer Blendung die Winkel gemessen, die bei normalem Sehen durch die Geraden Pupillenmitte - Sehobjekt und Pupillenmitte - Wimpernrand oben bzw. Pupillenmitte - Wimpernrand unten gegeben sind. Die Durchschnittswerte waren für "oben" $20{,}1^{\circ}$ für "unten" $39{,}9^{\circ}$. Die kleinsten und größten Werte für oben bzw. unten waren 10° und 28° bzw. 23° und 50°. Diese starke Streuung, die verschiedene Dichte der Wimpern und der Blendeinfluß (je stärker die Blendung ist, umso mehr werden die Lider gesenkt) lassen die widersprechenden Meinungen verständlich erscheinen, zumal der Unterschied in der Wirkung zwischen oberer und unterer Blendquelle gering ist. Die Messung in Bild 5 wurde mit den Normalbeobachter, Wimpernwinkel "oben" 22°, "unten" 43°, durchgeführt. Bei Winkeln über 70° nach oben und über 80° nach unten beginnt

-individuell verschieden - die Schattenwirkung der Ränder der Augenhöhlen. Im allgemeinen ist also bei geringer Blendung die Störwirkung durch Lichtquellen innerhalb eines Winkels von 20° (bei starker Blendung innerhalb von 10°) um die normale Sehrichtung von der speziellen Lage im Gesichtsfeld unabhängig. Sehr starke Blendung (Hornhautbeleuchtungsstärke von 1 000 lx) verkleinert diesen Winkel auf weniger als 10°. Bei größeren als den angegebenen Winkeln wird die Blendung bei "oben" liegender Störlichquelle etwas geringer. In allen folgenden Messungen beziehen sich die Winkelangaben auf seitliche Lagen der Blendquellen.

3) Einfluß der Entfernung und der Leuchtdichte der Blendquelle sowie der Hornhautbeleuchtungsstärke

Verändert man bei konstanter Testfeldleuchtdichte und bei konstantem Blendwinkel die Entfernung der Blendquelle und variiert deren Öffnung bei örtlicher und zeitlicher Konstanz der Leuchtdichte so, daß der Öffnungswinkel vom Auge aus unverändert bleibt, so ist wegen $E = \pi B \sin^2 u$ auch die Beleuchtungsstärke konstant, und es besteht kein Grund für eine Änderung der Unterschiedsempfindlichkeit. Das Auge ist nicht einmal in der Lage, die Entfernung der Blendquelle zu bestimmen, wenn diese z.B. durch ein Loch des feststehenden Testfeldes dargeboten wird und dieses ganz ausfüllt. Die Entfernung der Blendquelle für sich betrachtet, hat also logischerweise keinen Einfluß auf die Unterschiedsempfindlichkeit. Anders liegen die Verhältnisse, wenn man bei konstanter Blendquellenleuchtdichte und Blendquellenfläche die Entfernung verändert. Die übrigen Parameter bleiben konstant. In diesem Fall ist in erster Näherung die Beleuchtungsstärke dem Quadrat der Entfernung proportional; man erhält also nur eine Änderung der Beleuchtungsstärke. (Der Einfluß des Öffnungswinkels der Blendquelle wird im nächsten Kapitel bei der Flächenabhängigkeit behandelt, er kann hier vernachlässigt werden). Bild 6 zeigt für die Testfeldleuchtdichte 0,03 asb, den Blendwinkel 3° und die Blend-

quellenleuchtdichte 2 000 sb, die Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit von der Beleuchtungsstärke am Auge (variiert durch Entfernungsänderung). Es besteht ersichtlich ein deutlich erkennbarer Zusammenhang. Auf weitere Einzelheiten zur Frage der Augenbeleuchtungsstärke wird an späterer Stelle eingegangen. Als Gegenversuch kann man nun die Leuchtdichte der Blendquelle je nach Entfernung so verändern, daß die Beleuchtungsstärke am Auge konstant bleibt. Alle übrigen Parameter (ausgenommen der oben erwähnte Öffnungswinkel) bleiben wie im vorhergehenden Fall unverändert. Es zeigt sich kein Einfluß der Leuchtdichte auf die Unterschiedsempfindlichkeit, letztere bleibt konstant, ist also zumindest in dem Bereich der Leuchtdichte unter 2 000 sb nur von der Beleuchtungsstärke am Auge abhängig. Wir erhalten also eine vorläufige Bestätigung der HOLLADAY'schen Annahme.

4) Einfluß der Blendquellenfläche

Bild 7 zeigt die Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit von der Fläche einer Blendquelle konstanter Leuchtdichte. Da sich bei festem Abstand aber mit wachsender Fläche (wachsendem Öffnungswinkel) die Augenbeleuchtungsstärke vergrößert, stellt diese Kurve nicht die eigentliche Flächenwirkung dar.

Bei der Wirkung einer Störlichtquelle auf die Unterschiedsempfindlichkeit ist außerdem zu bedenken, daß ihr Einfluß vom Blendwinkel abhängt. Verschiedene Flächenelemente einer ausgedehnten Blendquelle werden daher auch bei gleicher Leuchtdichte und gleicher Entfernung im allgemeinen einen unterschiedlichen Einfluß auf die Sehfunktion ausüben. Gleicher Einfluß ist nur von solchen Flächenelementen zu erwarten, die auf einem Kreis um die Sehrichtung liegen und deshalb mit ihr den gleichen Blendwinkel einschließen.

Bei einer beliebigen Fläche muß man demnach zwei Sonderfälle

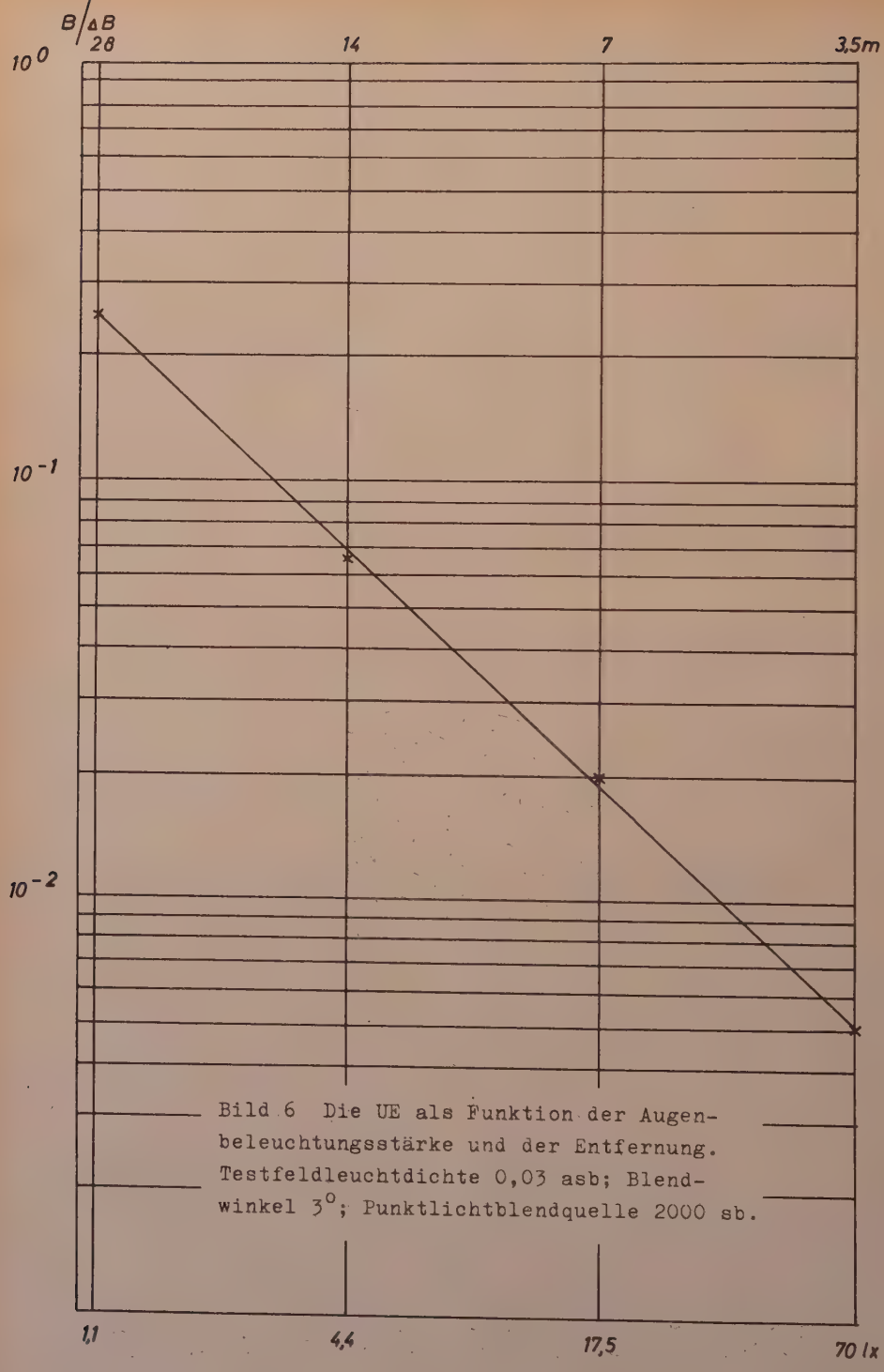


Bild 6 Die UE als Funktion der Augenbeleuchtungsstärke und der Entfernung. Testfeldleuchtdichte 0,03 asb; Blendwinkel 3°; Punktlichtblendquelle 2000 sb.

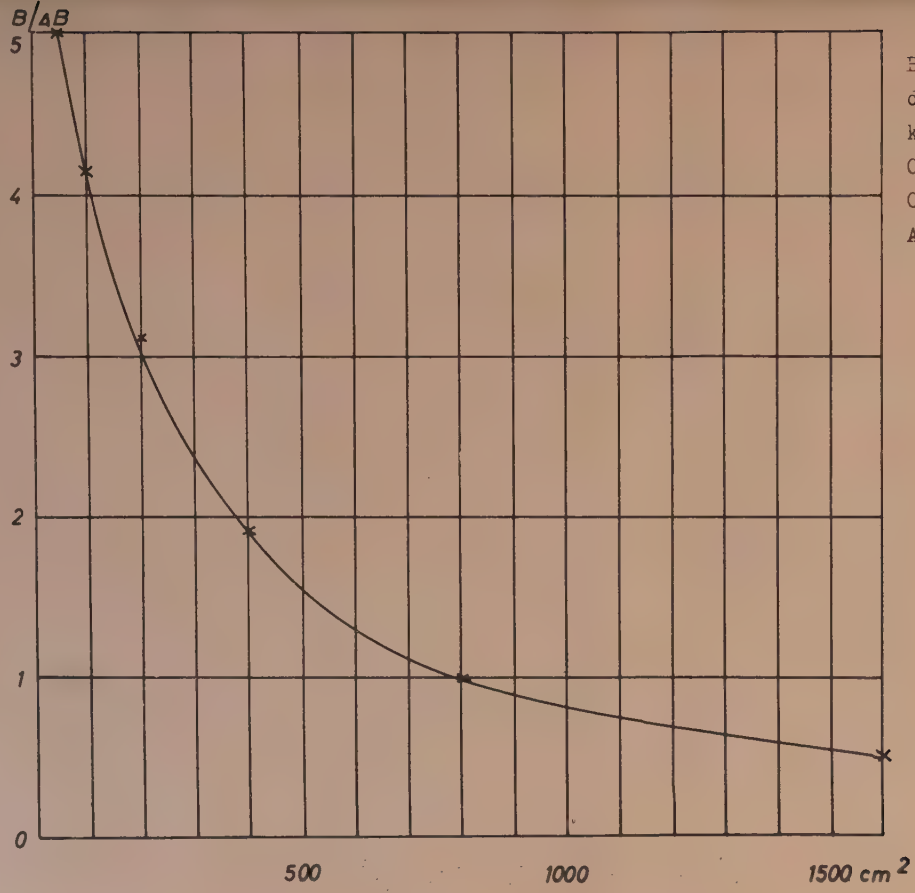


Bild 7 Die UE als Funktion der Blendquellenfläche bei konstanter Leuchtdichte von 0,3 sb. Testfeldleuchtdichte 0,3 asb; Blendwinkel 20°; max. Augenbeleuchtungsstärke 420 lx.

unterscheiden:

1. Die Ausdehnung der Fläche in Richtung konstanter Blendwinkel
2. Die Ausdehnung der Fläche in Richtung stärkster Blendwinkeländerung (senkrecht zu 1).

Nur der erste Fall stellt die "reine" Flächenwirkung dar. Der zweite Fall führt zur Definition des Blendwinkels bei ausgedehnten Flächen. Untersucht man die "reine" Flächenabhängigkeit, also die Wirkung einer Flächenvergrößerung in Richtung konstanter Blendwinkel, so findet man, daß bei konstanter Augenbeleuchtungsstärke eine Vergrößerung der Blendfläche bis zum fünfzehnfachen keine meßbare Änderung der Unterschiedsempfindlichkeit bewirkt. Die praktische und theoretische Bedeutung dieses Ergebnisses wird später noch besprochen.

Der Versuch wurde folgendermaßen durchgeführt: Sieben Nitraphotlampen, Durchmesser 10 cm, wurden in einer Entfernung von 130 cm so angeordnet, daß sie auf einem Halbkreis um die Blickrichtung lagen und ihr Blendwinkel (zu den Lampenmitten gemessen) 10° betrug. Die Anordnung im unteren Halbkreis, statt im Vollkreis, wurde gewählt, um die Gefahr der Wimpernabschattung der oberen Lampen zu vermeiden. Bei der maximalen Augenbeleuchtungsstärke von 1 000 lx wird, wie schon früher erwähnt, ein Winkel von 10° oben bereits abgeschattet, da unwillkürlich die Augenlider gesenkt werden. Mit dieser Anordnung wurde bei 1 000, 500 und 250 lx Augenbeleuchtungsstärke der Flächeneinfluß gemessen, indem die jeweilige Beleuchtungsstärke einmal mit einer Lampe, das andere Mal mit sieben Lampen eingestellt wurde. Auch die Blendwinkel 6° und 30° wurden untersucht und zeigten im angegebenen Sinne keine Flächenabhängigkeit. Ein entsprechender Versuch, bei dem die Fläche auf das 15-fache vergrößert wurde, zeigte das gleiche Ergebnis.

Anders liegen die Verhältnisse im zweiten Fall bei der Flächenveränderung in Richtung stärkster Blendwinkeländerung, d.h.

senkrecht zur Blickrichtung. Wenn überhaupt eine Winkelabhängigkeit der Blendung vorliegt und diese monoton ist, so muß schon rein theoretisch ein entsprechender Flächeneinfluß auftreten. Ist die Leuchtdichte der Fläche konstant, so ergibt sich zusätzlich noch ein unterschiedlicher Beitrag der Flächenelemente zur Gesamtbeleuchtungsstärke. Hier kommt allerdings der günstige Umstand zur Geltung, daß sich im Bereich kleiner Blendwinkel (kleiner Einfallswinkel) der Kosinus nur wenig ändert, im Bereich großer Blendwinkel (großer Einfallswinkel) der Grad der Blendung bereits so gering ist, daß sich insgesamt kein wesentlicher Unterschied ergibt zwischen der Blendwinkeländerung bei konstanter Leuchtdichte der Störlichquelle und konstanter Beleuchtungsstärke am Auge (parallel zur Pupillenfläche).

Bild 8 zeigt für zwei verschiedene Testfeldleuchtdichten die Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit vom Blendwinkel und zwar die Kreuze für konstante Leuchtdichte, die Kreise für konstante Beleuchtungsstärke. Diese Darstellung erklärt gleichzeitig, daß es keine Diskrepanz ist, wenn HARRISON in seiner Blendformel mit der Leuchtdichte der Blendquelle, HOLLADAY dagegen mit der Hornhautbeleuchtungsstärke arbeitet. Auf die Frage der Blendwinkelabhängigkeit selbst wird an späterer Stelle noch ausführlich eingegangen. Hier soll vorerst rein formal eine erweiterte Blendwinkeldefinition angeschlossen werden: Der Blendwinkel ist der Winkel zwischen der Blickrichtung und einer Stelle im Gesichtsfeld, in der man sich die Störlichtquelle(n) vereinigt denken kann, so daß bei gleicher Augenbeleuchtungsstärke die gleiche Blendwirkung zustande kommt. Diese Stelle ist dabei nicht punktförmig im mathematischen Sinne zu denken. Die zulässige Größe solcher Flächenelemente kann man durch folgende Forderung festlegen: Eine Verkleinerung der Fläche bei konstanter Entfernung darf bei entsprechender Erhöhung der Leuchtdichte ($B \sim 1/F$) keine größere Änderung der Unterschiedsempfindlichkeit geben, als

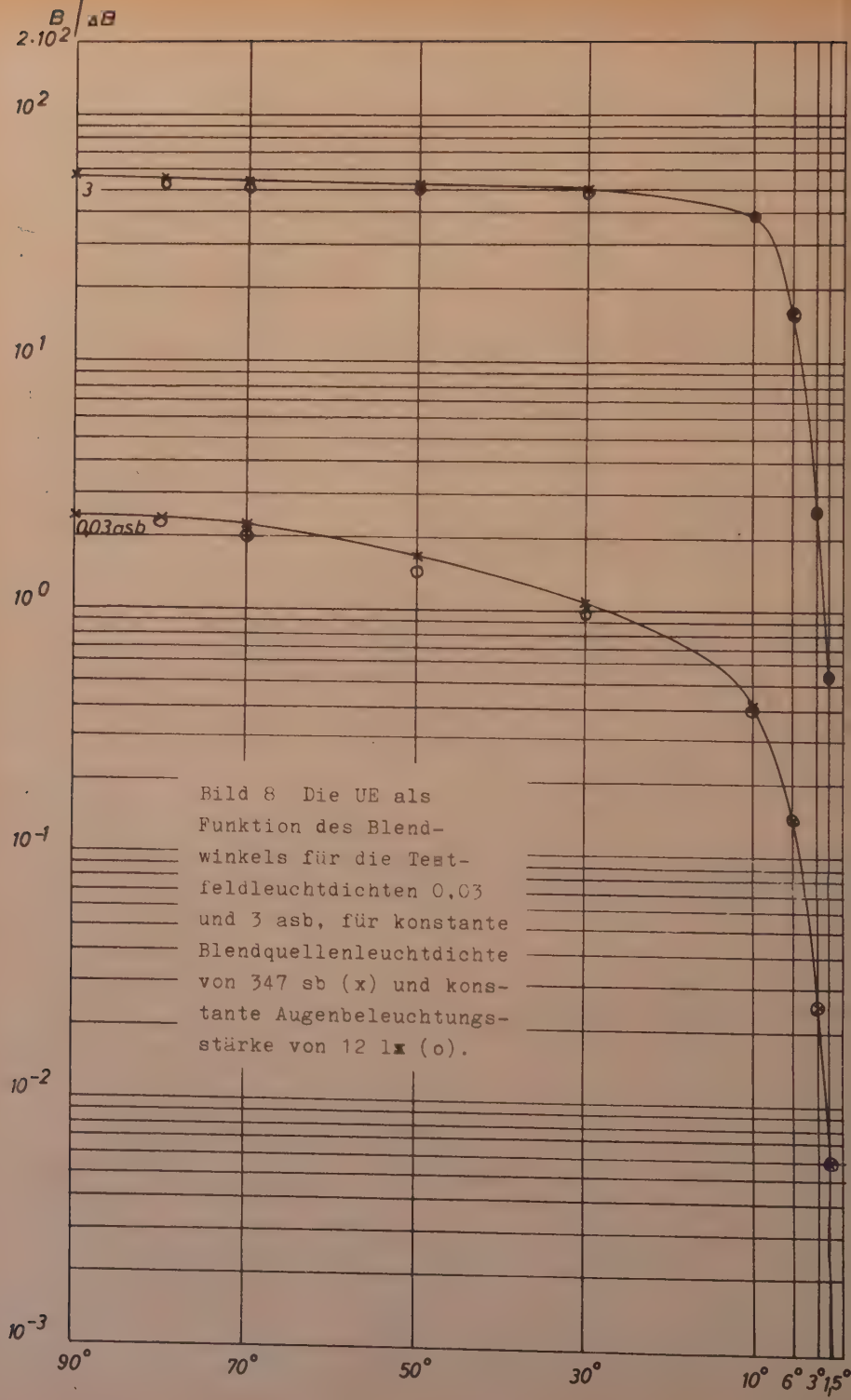


Bild 8 Die UE als Funktion des Blendwinkels für die Testfeldleuchtdichten 0,03 und 3 asb, für konstante Blendquellenleuchtdichte von 347 sb (x) und konstante Augenbeleuchtungsstärke von 12 lx (o).

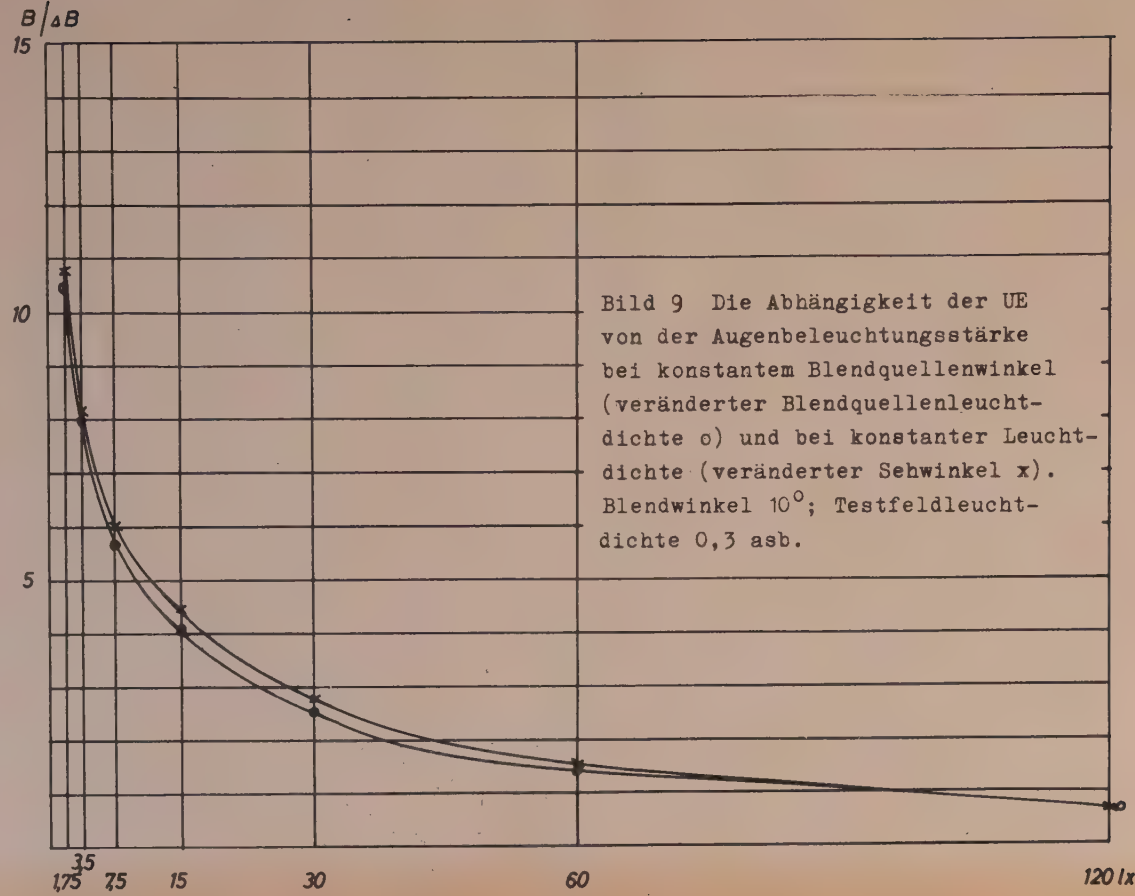


Bild 9 Die Abhängigkeit der UE von der Augenbeleuchtungsstärke bei konstantem Blendquellenwinkel (veränderter Blendquellenleuchtdichte o) und bei konstanter Leuchtdichte (veränderter Sehwinkel x). Blendwinkel 10°; Testfeldleuchtdichte 0,3 asb.

einem vorgegebenen Wert (z.B. der Meßgenauigkeit) entspricht.

Für eine spezielle Blendsituation zeigt Bild 9 die Unterschiedsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Hornhautbeleuchtungsstärke. Der Blendwinkel war 8° (zur Blendquellenmitte gemessen), der Abstand der Blendquelle 120 cm, die Testfeldleuchtdichte 0,3 asb. Verändert man die Beleuchtungsstärke, indem man einmal bei konstanter Leuchtdichte (3 sb) die Fläche der Blendquellen, das andere Mal bei konstanter Fläche (Durchmesser 8,5 cm) die Leuchtdichte variiert, so erhält man 2 Kurven, die sich offenbar durch den Flächeneinfluß unterscheiden. Es ist zu erkennen, daß die Verkleinerung der Fläche (obere Kurve x) zu etwas höheren Werten der Unterschiedsempfindlichkeit führt, als die Leuchtdichteänderung (untere Kurve o). Allerdings sind eine große Zahl sorgfältiger Messungen nötig, um durch Mittelung überhaupt einen Unterschied zu finden. In der Praxis kann er, wie später gezeigt wird, sicher vernachlässigt werden.

Da die Fläche in diesem Versuch einem Öffnungswinkel von etwa 4° entspricht, ist hiermit die Größe einer Fläche oder eines Flächenelementes gefunden, bei dem der Flächeneinfluß meßtechnisch nachweisbar, praktisch aber bedeutungslos ist. Außerdem kann bei solchen Öffnungswinkeln der Blendwinkel zur Mitte der Fläche gemessen werden. Die Untersuchungen über Blendflächen, deren Öffnungswinkel in Richtung stärkster Blendwinkeländerung größer als 4° sind, folgen an späterer Stelle. Diese Messungen stehen in engem Zusammenhang mit der Frage nach der Summierbarkeit der Blendwirkung mehrerer Blendquellen und setzt außerdem die Kenntnis der Winkelabhängigkeit der Blendung voraus.

5) Der Blendungsgrad

Es ist schon an verschiedenen Stellen rein qualitativ von der Blendung bzw. vom Blendungsgrad gesprochen worden. Da dieser

Begriff noch öfter verwendet wird, ist es zweckmäßig, ihn exakt zu definieren: Im folgenden bedeutet β den Blendungsgrad und es soll gelten $\beta = \log (UE_o/UE)$. Es bedeuten UE_o die Unterschiedsempfindlichkeit ohne die Blendquelle(n), deren Störwirkung ermittelt werden soll, UE die Unterschiedsempfindlichkeit mit dieser Blendung. Diese Definition erscheint zweckmäßig, da sich bei fehlender Blendung ($UE = UE_o$), $\beta = 0$ ergibt und das Verhältnis UE_o/UE mehrere Zehnerpotenzen betragen kann. Ist die Testfeldleuchtdichte B mit und ohne Störlicht gleich, so geht die Definiton über in $B = \log \Delta B/\Delta B_o$. Wird durch die Blendlichtquelle das Infeld (= Testfeld) beleuchtet, so sind B und B_o verschieden. Da die Unterschiedsempfindlichkeit mit wachsender Testfeldleuchtdichte (bis $\sim 10^4$ asb) ansteigt, mit wachsender Störbeleuchtung am Auge aber sinkt, hängt es bei einer bestimmten Beleuchtungssituation vom Verhältnis Nutzbeleuchtung zu Blendbeleuchtung ab, ob eine spezielle Lichtquelle günstig oder schädlich ist. Wird für ein Sehproblem durch das Zuschalten einer Lichtquelle β positiv, so handelt es sich um eine physiologische Blendquelle. Wird β negativ, so haben wir eine Nutzlichtquelle vor uns. Ist β gleich Null, so ist diese Lichtquelle, zumindest unter den gewählten Bedingungen, sinnlos. Den Fall $B_o = 0$ oder $B = 0$ müssen wir ausschalten, da hierfür die Unterschiedsempfindlichkeit nicht definiert ist, obwohl dies grundsätzlich möglich wäre (Eigengrau der Netzhaut). Bei allen vorliegenden Untersuchungen wurde die Infeldleuchtdichte B durch die Blendquelle nicht beeinflußt.

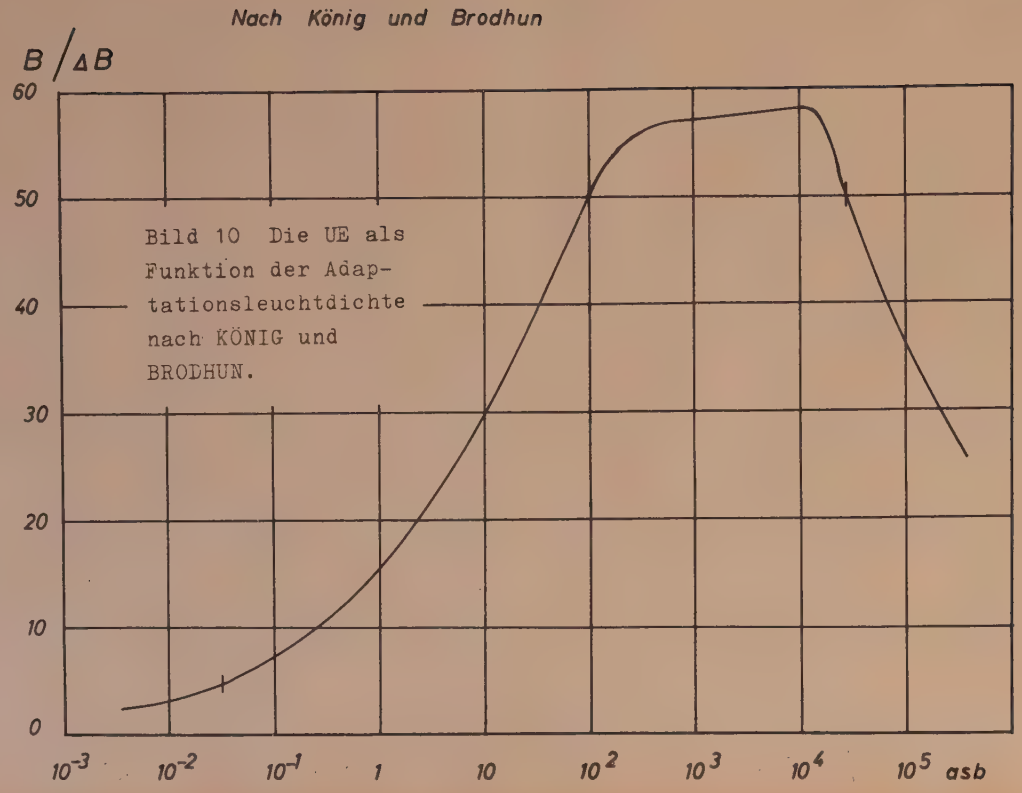
6) Der Einfluß der Grundadaptationsleuchtdichte auf die Blendung

Die Grundadaptationsleuchtdichte ist bei den hier abgehandelten Untersuchungen identisch mit der Testfeldleuchtdichte. Die von den verwendeten Testfeldleuchtdichten erzeugten Augenbeleuchtungsstärken sind in Tabelle 1 angegeben.

Der Zusammenhang zwischen der Unterschiedsempfindlichkeit und der Adaptationsleuchtdichte ohne Störlichtquelle wird in dem

von KÖNIG und BRODHUN erweiterten WEBER-FECHNER'schen Gesetz dargestellt. Bild 10 zeigt diese Kurve, die für die physiologische Seite der Licht- und Beleuchtungstechnik von grundsätzlicher Bedeutung ist. Die Unterschiedsempfindlichkeit steigt demnach mit wachsender Adaptationsleuchtdichte (Gesichtsfeldleuchtdichte) an, erreicht bei etwa 300 asb ein Maximum, bleibt dann im eigentlichen WEBER-FECHNER'schen Bereich bis etwa 10 000 asb konstant und fällt bei noch höheren Leuchtdichten als Folge der Gesichtsfeldblendung wieder ab. Es soll nun gezeigt werden, wie eine Störlichtquelle diesen Sachverhalt verändert. Bild 11 zeigt (in doppelt logarithmischem Maßstab) als oberste Kurve einen Ausschnitt aus der Kurve von KÖNIG und BRODHUN. Der Bereich ist in Bild 10 durch zwei kurze Striche angedeutet. Die qualitative Übereinstimmung beider Kurven ist (bei Berücksichtigung der Maßstabänderung) deutlich zu erkennen. Der quantitative Unterschied in der absoluten Höhe entsprechender $B/\Delta B$-Werte erklärt sich aus den verschiedenartigen Bedingungen. Im vorliegenden Fall wurde beidäugig und im freien Sehen beobachtet; bei König und Brodhun aber einäugig und beim Photometrieren. Das ausgeprägte Plateau in der KÖNIG-BRODHUN'schen Kurve entsteht wohl dadurch, daß diese unter den Bedingungen beim Photometrieren ermittelt wurde. Eine Messung von ARNDT zeigt wie in Bild 11 ein flach verlaufendes Maximum.

Als Störlichtquelle wurde die Punktlichtquelle mit einer Leuchtdichte von 2 000 sb und einer maximalen Hornhautbeleuchtungsstärke von 70 lx verwendet. Der Kurvenparameter in Bild 10 ist der Blendwinkel. Die Messungen sind bei konstanter Blendquellenleuchtdichte, also bei variabler Hornhautbeleuchtungsstärke, durchgeführt. Das entspricht der Praxis, in der ja im allgemeinen die Leuchtdichte der Blendquellen (Autoscheinwerfer, Straßenleuchten, Innenraumleuchten) auch konstante mittlere Leuchtdichte besitzen. Außerdem ergeben sich, wie schon in Seite 27 dargelegt und in Bild 8 gezeigt, zwischen Kurven kon-


Nach König und Brodhun
B / ΔB
60
50
40
30
20
10
0
Bild 10 Die UE als Funktion der Adaptationsleuchtdichte nach KÖNIG und BRODHUN.
10^-3
10^-2
10^-1
1
10
10^2
10^3
10^4
10^5 asb

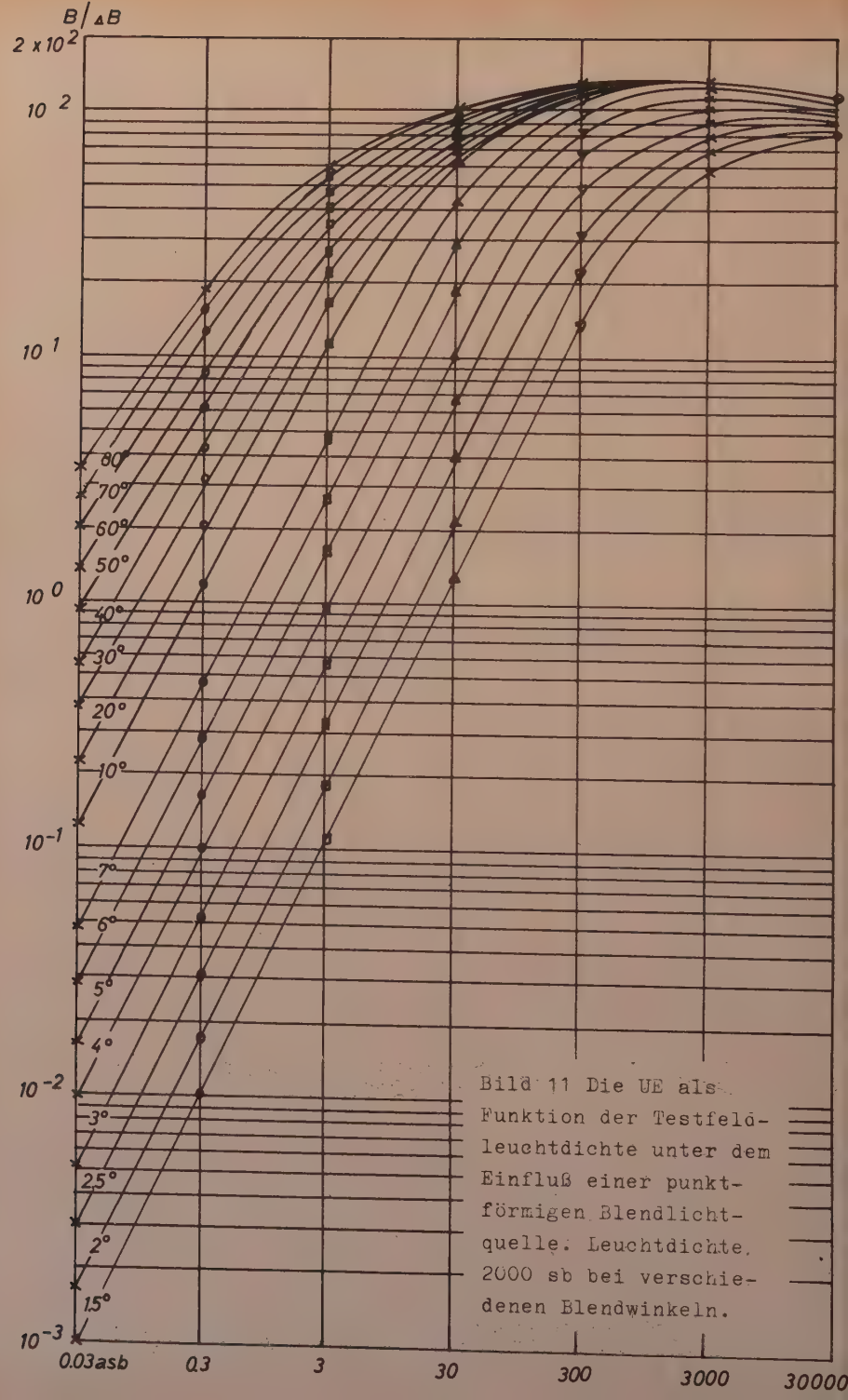


Bild 11 Die UE als Funktion der Testfeldleuchtdichte unter dem Einfluß einer punktförmigen Blendlichtquelle. Leuchtdichte 2000 sb bei verschiedenen Blendwinkeln.

stanter Leuchtdichte und konstanter Beleuchtungsstärke keine wesentlichen Unterschiede.

Das Charakteristische in Bild 11 ist der ähnliche Verlauf der Kurven für verschiedene Winkel und die weitgehende Übereinstimmung der Kurvenneigung besonders bei kleinen Testfeldleuchtdichten. Das führt dazu, daß der Blendungsgrad (in Bild 11 Abstand der Unterschiedempfindlichkeits-Werte zwischen Schwelle und Blendwert bei einer bestimmten Testfeldleuchtdichte) konstant wird, da die Kurven zunehmend parallel laufen. Damit wird der Blendungsgrad unabhängig von der Testfeldleuchtdichte (Grundadaptation). Qualitativ ist das zu erwarten, da bei niedriger Grundadaptation die Unterschiedsempfindlichkeit eine reine Rechengröße wird. Sehr gut ist der Zusammenhang, z.B. an der Kurve für den Blendwinkel $1{,}5^{\circ}$ zu erkennen. Für Testfeldleuchtdichten unter 300 asb ist der Verlauf praktisch geradlinig und zwar so, daß die Unterschiedsempfindlichkeit der Infeldleuchtdichte proportional ist, d.h. $B/\triangle B \sim B$. Das ist aber nur möglich, wenn $\triangle B$ konstant ist. Die Erkennbarkeit des Prüfflecks hängt also nur noch von der Blendquelle ab - oder anders ausgedrückt : das Adaptationsniveau wird von der Blendquelle bestimmt. Entsprechend liegen die Verhältnisse an der Schwelle. Bei sehr kleinen Testfeldleuchtdichten (bei der vorliegenden Anordnung und den verwendeten Kriterien unter 10^{-3} asb) wird die Erkennbarkeit des Prüfflecks vom Testfeld weitgehend unabhängig. Extrapoliert man die Schwellenkurve bis zum Schnitt mit einer verlängerten Abszisse, so erhält man für $B/\triangle B = 10^{-3}$ eine Testfeldleuchtdichte von 10^{-5} asb. Daraus ergibt sich eine Prüffleckleuchtdichte von 10^{-2} asb, was einer Pupillenbeleuchtungsstärke von $7{,}6 \cdot 10^{-7}$ lx entspricht. Unter Berücksichtigung des Kriteriums (Formenerkennen) und des fovealen Sehens, ein Ergebnis, das gut mit anderen Angaben übereinstimmt.

Mit steigender Testfeldleuchtdichte nimmt der Blendungsgrad ab und geht umso eher gegen Null, je größer der Blendwinkel ist.

Hier zeigt sich die entgegengesetzte Wirkung: Die Adaptation wird zunehmend durch die Testfeldleuchtdichte bestimmt, bei sehr hohen Werten (>10 000 asb) beginnt bereits die Blendwirkung des Infeldes, wogegen die eigentliche Blendquelle, je nach Augenbeleuchtungsstärke und Blendwinkel, mehr an Einfluß verliert, so daß die Kurvenschar schließlich in eine einzige Kurve ausläuft.

Trägt man für verschiedene Blendwinkel den Blendungsgrad in Abhängigkeit von der Testfeldleuchtdichte auf, so erhält man Bild 12, aus dem die eben geschilderten Zusammenhänge deutlich hervorgehen. Die Kurven zeigen bei niedrigen Leuchtdichten eine geringe Abhängigkeit des Blendungsgrades von der Testfeldleuchtdichte. Diese Abhängigkeit nimmt dann zu, erreicht im Wendepunkt ein Maximum, wird wieder geringer und geht bei hohen Infeldleuchtdichten gegen Null. Die Steigungen der Kurven sind also unmittelbar ein Maßstab für den Einfluß des Adaptationsniveaus. Benutzt man nicht die Blendwinkel als Parameter, sondern die von der Störlichtquelle erzeugte Hornhautbeleuchtungsstärke, so ergeben sich ganz ähnliche Kurven. Zum Beispiel zeigen die Ringe in der 4°-, 10°- und 50°-Kurve den Verlauf für $1{,}5^{\circ}$, bei 7 lx, $1{,}5^{\circ}$ bei 0,5 lx und $1{,}5^{\circ}$ bei 0,06 lx. Es gibt zu jedem Blendwinkel-Beleuchtungsstärke-Paar innerhalb weiter Grenzen andere Paare, welche praktisch die gleiche Blendungskurve in Abhängigkeit von der Testfeldleuchtdichte ergeben.

7) Der Einfluß der Hornhautbeleuchtungsstärke auf Unterschiedsempfindlichkeit und Blendungsgrad

Wie schon im dritten Kapitel nachgewiesen, ist nicht die Leuchtdichte der Blendquelle, sondern die von ihr erzeugte Augenbeleuchtungsstärke die entscheidende Einflußgröße. Aus den schon früher erwähnten Gründen (S. 27, Bild 8, S. 30) und um zu einer einheitlichen Darstellung, besonders der im nächsten Kapitel

beschriebenen Winkelabhängigkeit zu kommen, wurde die Leuchtdichteangabe beibehalten. Da der Öffnungswinkel der Blendquelle bei den Messungen konstant blieb, besteht für einen bestimmten Blendwinkel ein fester Zusammenhang zwischen Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken. Letztere sind in dem Diagramm oben angeschrieben.

Die Bilder 13, 14 und 15 zeigen die Unterschiedsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Augenbeleuchtungsstärke. Kurvenparameter ist die Testfeldleuchtdichte. Bild 13 zeigt die Zusammenhänge bei einem Blendwinkel von $1{,}5^{\circ}$, Bild 14 bei 3°, Bild 15 bei 6°. Da bei der hier gewählten Darstellungsart die Testfeldleuchtdichte als Kurvenparameter benutzt wurde, stellt der senkrechte Abstand vom zugehörigen Zahlenwert für jeden Punkt den Blendungsgrad dar. Die zugehörigen Blendungsgradkurven können also unmittelbar aus den Bildern 13, 14 und 15 entnommen werden. Bei geeigneter Maßstabswahl kann man entsprechende Blendungsgrad- und Unterschiedlichkeitskurven spiegelbildlich zur Deckung bringen. Bild 16 zeigt für die Adaptationsleuchtdichte 0,03 asb und die Blendwinkel $1{,}5^{\circ}$, 3° und 6° den Blendungsgrad in Abhängigkeit von der Augenbeleuchtungsstärke.

Eine einfache formelmäßige Darstellung der Abhängigkeit des Blendungsgrades von der Augenbeleuchtungsstärke E_A hat im Bereich starker Blendung folgendes Aussehen:

$$\beta = f(\theta, B) + c \log E_A$$

Es bedeuten β = Logarithmus UE_o/UE = Blendungsgrad, c Neigung des geradlinigen Kurventeils, E_A = Augenbeleuchtungsstärke (hier könnte bei konstantem Öffnungswinkel ohne großen Fehler auch die Leuchtdichte der Blendquelle stehen), $f(\theta, B)$ = Funktion des Blendwinkels und der Grundadaptationsleuchtdichte B (Infeld-oder Testfeldleuchtdichte).

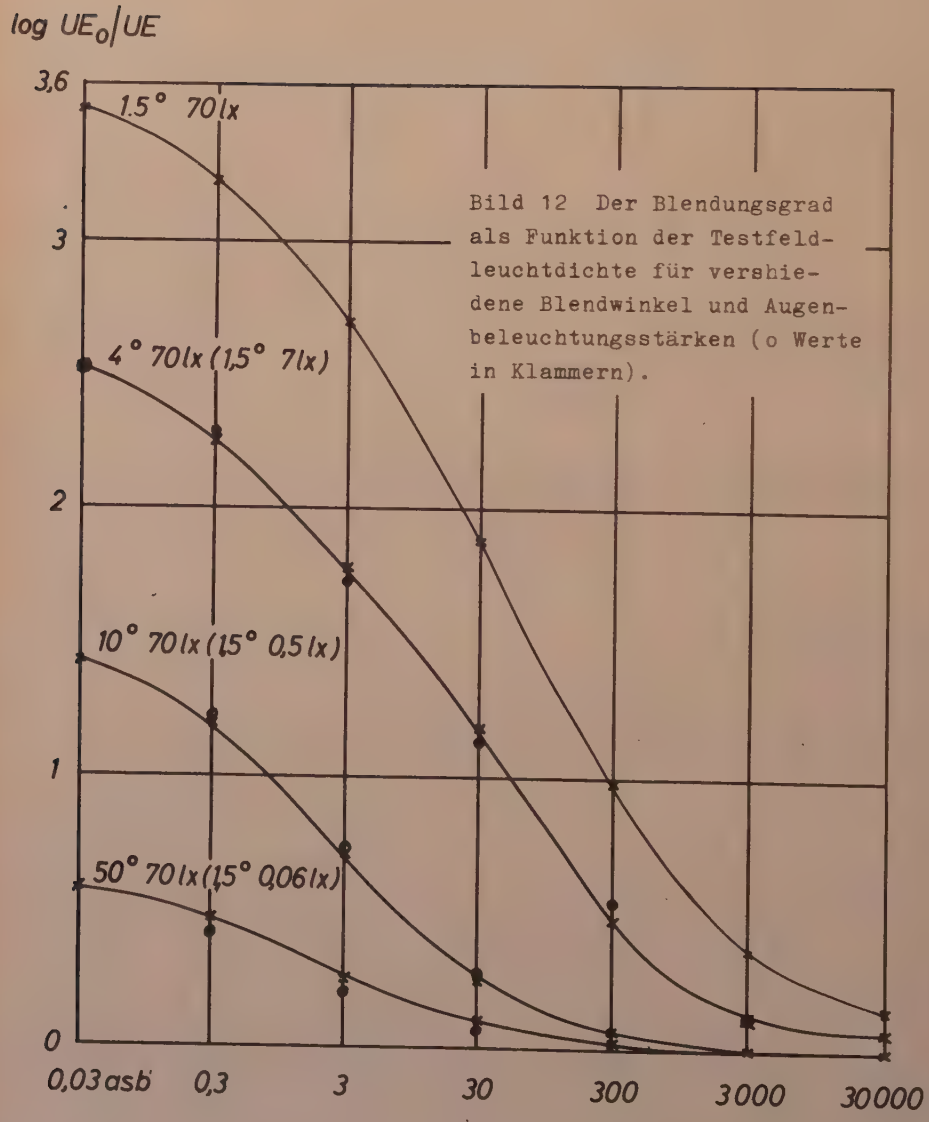


Bild 12 Der Blendungsgrad als Funktion der Testfeldleuchtdichte für vershiedene Blendwinkel und Augenbeleuchtungsstärken (o Werte in Klammern).

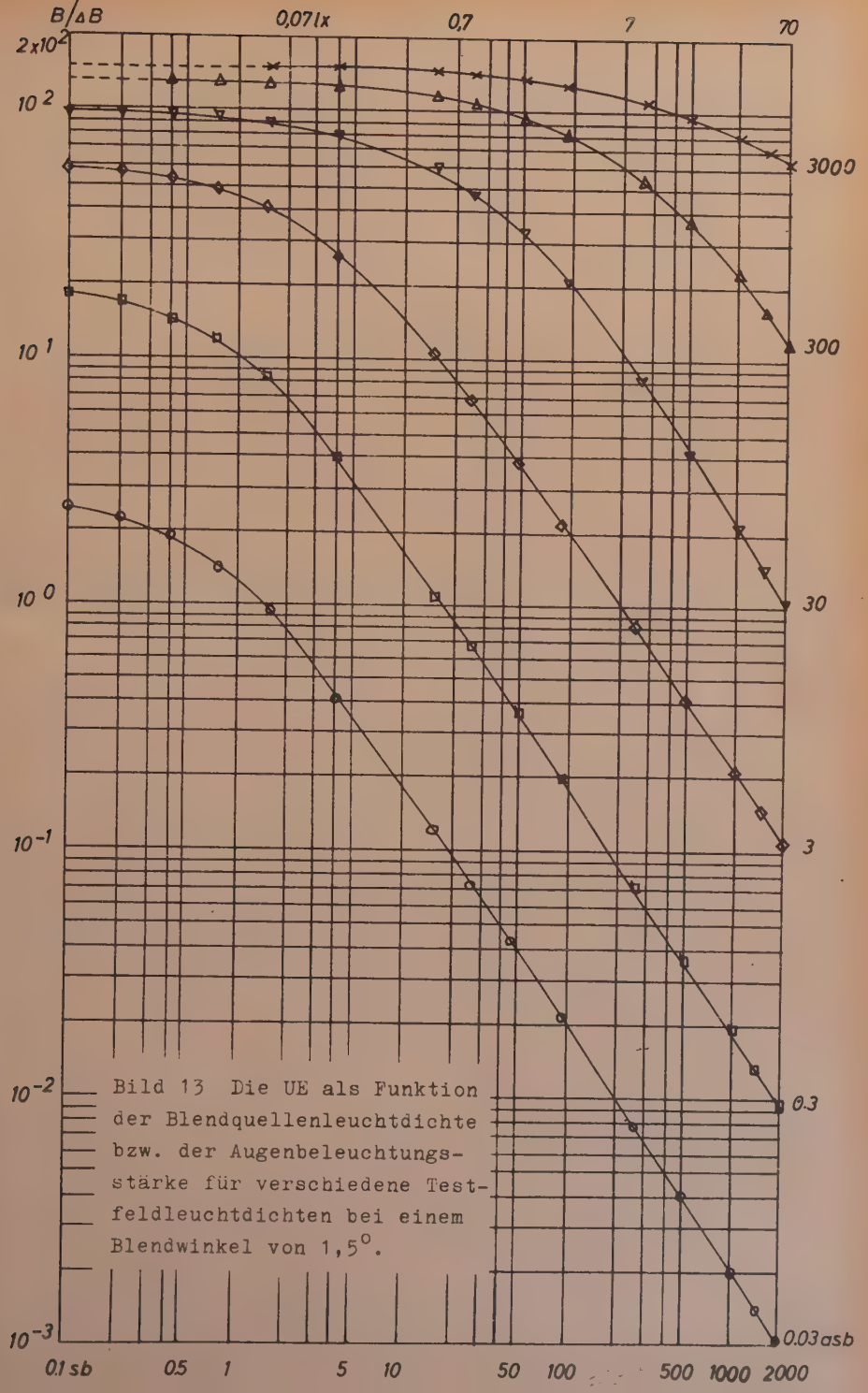


Bild 13 Die UE als Funktion der Blendquellenleuchtdichte bzw. der Augenbeleuchtungsstärke für verschiedene Testfeldleuchtdichten bei einem Blendwinkel von 1,5°.

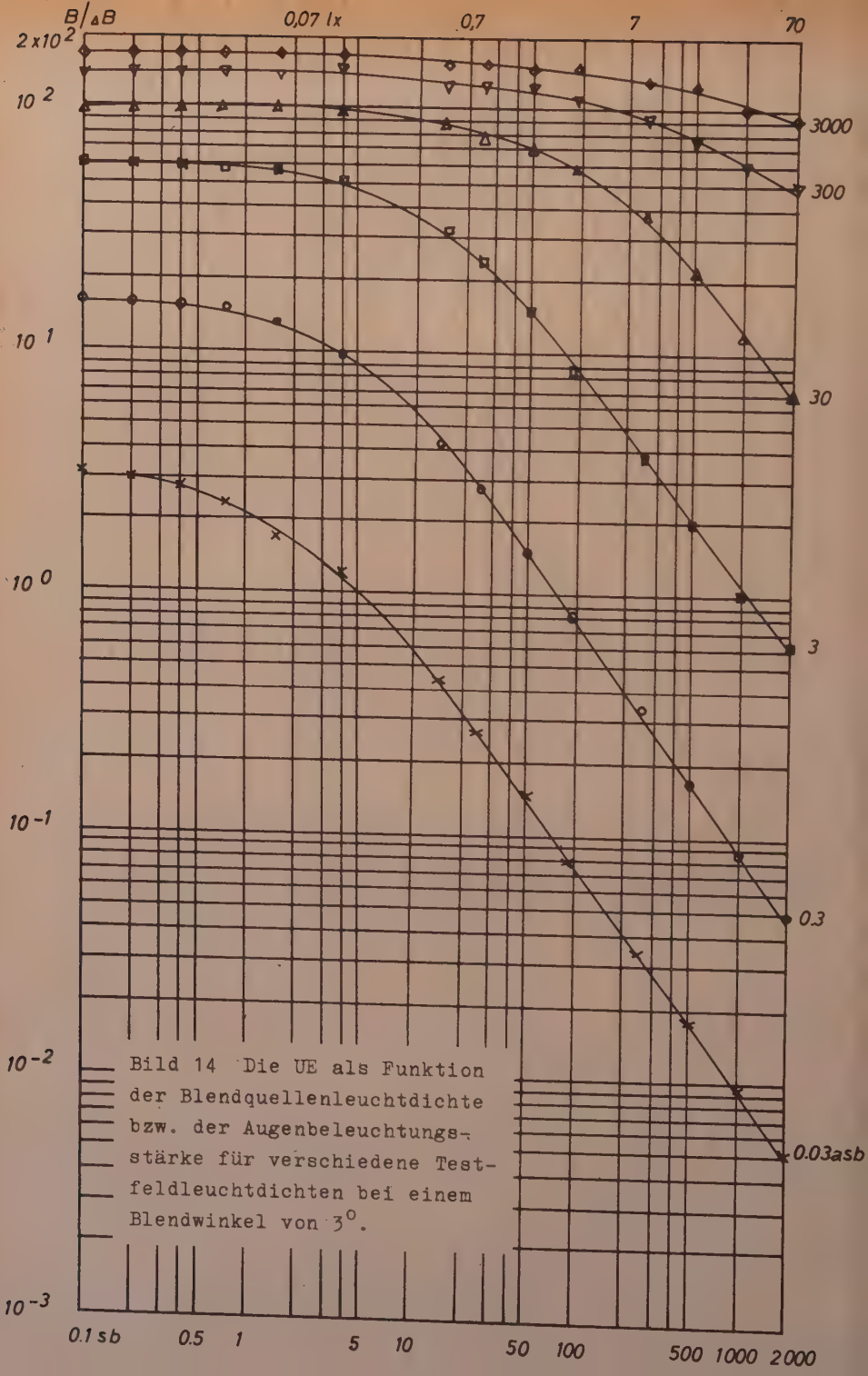


Bild 14 Die UE als Funktion der Blendquellenleuchtdichte bzw. der Augenbeleuchtungsstärke für verschiedene Testfeldleuchtdichten bei einem Blendwinkel von 3°.

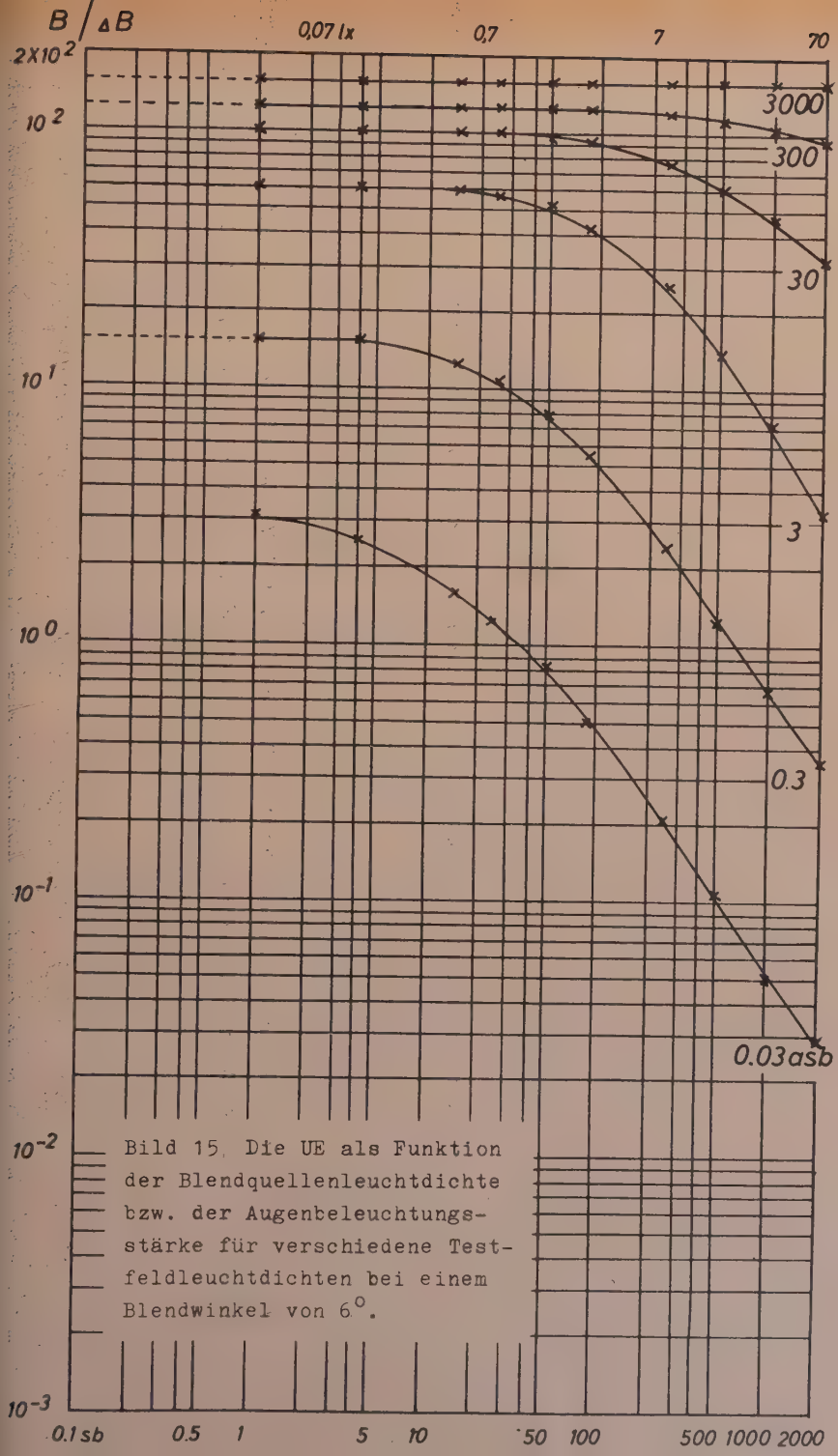


Bild 15. Die UE als Funktion der Blendquellenleuchtdichte bzw. der Augenbeleuchtungsstärke für verschiedene Testfeldleuchtdichten bei einem Blendwinkel von 6°.

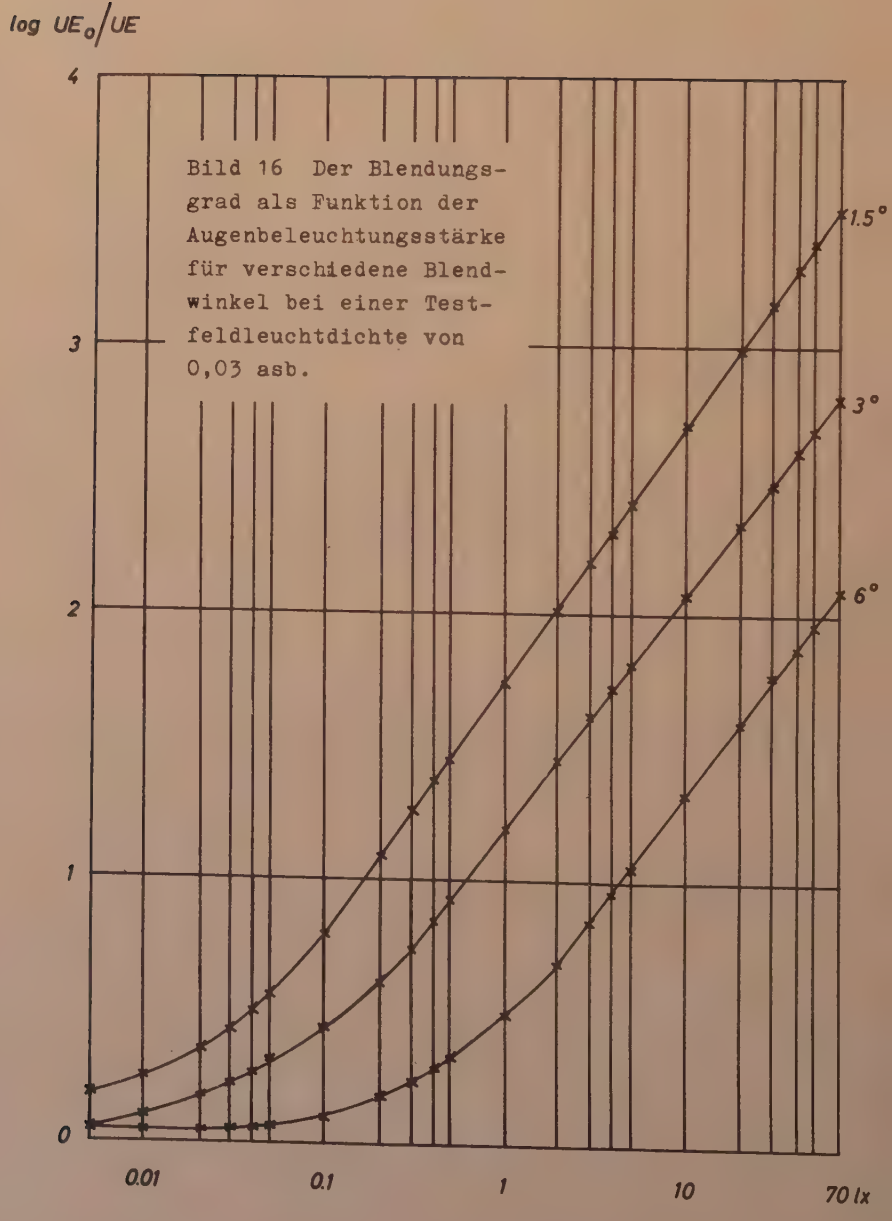


Bild 16 Der Blendungsgrad als Funktion der Augenbeleuchtungsstärke für verschiedene Blendwinkel bei einer Testfeldleuchtdichte von 0,03 asb.

Ist der Einfluß der Blendquelle (E_A) groß gegen die Testfeldleuchtdichte, so erhält man entsprechend Bild 16 die geradlinigen, unter sich parallelen Teile der Kurven, deren Abstände eine Funktion des Blendwinkels und der Testfeldleuchtdichte sind. Betrachtet man eine einzelne Kurve, so ist für diese Θ und B konstant. Der Neigungswinkel der Kurven (c) kann offenbar mit hinreichender Genauigkeit gleich 1 gesetzt werden. Damit geht die Beziehung über in

$$\beta = k + \log E_A$$

oder mit $\beta = \log UE_o/UE$ folgt $UE_o/UE = k' \cdot E_A$. Da für ein bestimmtes B auch UE_o konstant ist, ergibt sich schließlich

$$UE \sim \frac{1}{E_A}$$

Die genannten Beziehungen gelten aber nur bei starker Blendung ($\beta > 1$), die dadurch gekennzeichnet ist, daß das Adaptationsniveau praktisch nur durch die Blendwirkung eingestellt wird. Der Einfluß der Testfeldleuchtdichte muß dagegen zu vernachlässigen sein. Eine formelmäßige Darstellung im Bereich schwacher Blendung ($\beta < 1$) ist außerordentlich schwierig. Diese Frage wird im Verlauf der zusammenfassenden Darstellung noch besprochen. Rein qualitativ kann festgestellt werden, daß hier der Blendungsgrad umso weniger durch die von der Blendquelle erzeugte Augenbeleuchtungsstärke beeinflußt wird, je höher die Grundadaptation und je größer der Blendwinkel ist. Ehe auf diese Frage ausführlicher eingegangen wird, soll noch die Wirkung des Blendwinkels untersucht werden.

8) Der Einfluß des Blendwinkels

Es ist in der vorangehenden Darstellung immer wieder auf die Wirkung des Blendwinkels hingewiesen worden. Eine genauere Untersuchung dieser Größe lehrt, daß sie im Bereich kleiner Winkel den weitaus stärksten Einfluß auf die Unterschiedsempfindlichkeit und den Blendungsgrad besitzt. Bild 17 zeigt für eine

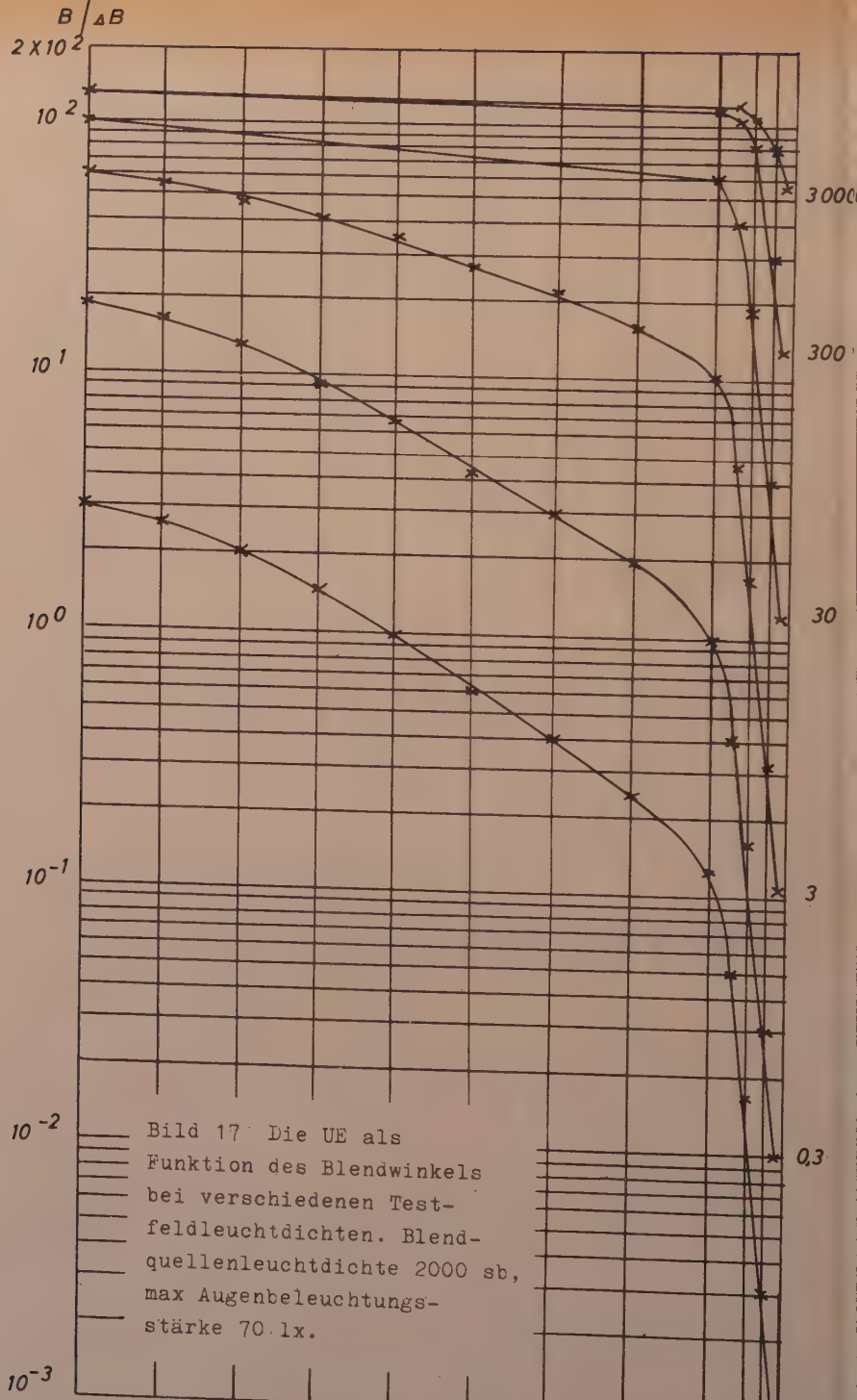


Bild 17 Die UE als Funktion des Blendwinkels bei verschiedenen Testfeldleuchtdichten. Blendquellenleuchtdichte 2000 sb, max Augenbeleuchtungsstärke 70 lx.

Punktlichtquelle mit einer mittleren Leuchtdichte von 2 000 sb und einer von ihr erzeugten maximalen Hornhautbeleuchtungsstärke von 70 lx, die Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit vom Blendwinkel bei verschiedenen Testfeldleuchtdichten. Wegen der konstanten Leuchtdichte (statt konstanter Beleuchtungsstärke parallel zur Pupillenfläche) sei nochmals auf Seite 27 und Bild 8 hingewiesen. Bild 17 läßt deutlich erkennen, daß man offenbar bei allen dargestellten Kurven zwei Blendwinkelbereiche unterscheiden muß. Bei Blendwinkeln $< 10^{\circ}$ steigt die Unterschiedsempfindlichkeit mit wachsendem Winkel steil an und geht dann für Winkel $> 10^{\circ}$ mit einem deutlichen Knick in einen flachen Kurventeil über. Bei genauerer Betrachtung ist besonders bei den Kurven 0,03, 0,3 und 3 asb zu sehen, daß sie sich zwischen 60° und 70° noch einmal leicht verflachen. Es ist bei dieser Darstellung zu beachten, daß der Blendwinkel in linearem Maßstab angetragen ist. Da auch hier (wie in den Bildern 13, 14 und 15) die Testfeldleuchtdichte als Parameter benutzt wurde, kann man unmittelbar die Blendungsgradkurve erkennen. Es gilt das gleiche, was schon auf Seite 33 ausgeführt wurde. Bild 18 zeigt die Abhängigkeit des Blendungsgrades vom Blendwinkel.

Qualitativ gibt es für die verschiedenen Kurventeile folgende Erklärung:
Die leichte Krümmung bei Blendwinkeln zwischen 60° und 70° kommt dadurch zustande, daß für größere Winkel ein Auge im Nasenschatten liegt, d.h., nicht mehr geblendet wird. Hält man ein Auge blendfrei, so erhält man immer bessere Werte der Unterschiedsempfindlichkeit bzw. kleineren Blendungsgrad als bei beidäugiger Beobachtung. Anders ausgedrückt muß sich der Übergang von einäugiger zu beidäugiger Blendung in einem steileren Abfall der Unterschiedsempfindlichkeit, bzw. steileren Anstieg des Blendungsgrades bemerkbar machen. Im allgemeinen wird im nicht geblendeten Auge der Schwellenwert nahezu aufrechterhalten. (Diese Frage wird am Schluß der vorliegenden Arbeit ausführlicher erörtert).

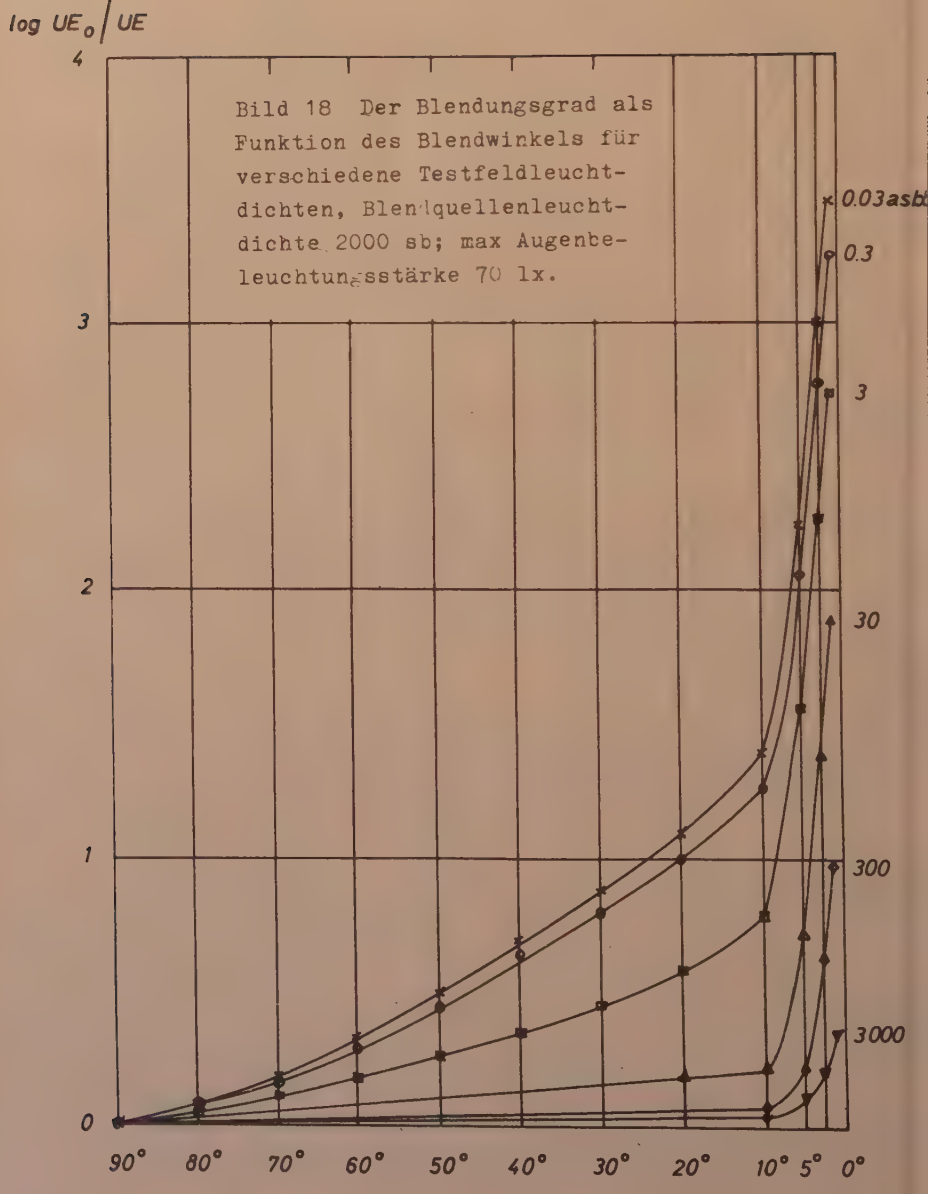


Bild 18 Der Blendungsgrad als Funktion des Blendwinkels für verschiedene Testfeldleuchtdichten, Blendquellenleuchtdichte 2000 sb; max Augenbeleuchtungsstärke 70 lx.

Der Winkelbereich zwischen 10° und 60° stellt die eigentliche Blendwinkelabhängigkeit dar und liefert im wesentlichen einen linearen Zusammenhang zwischen Blendungsgrad und Blendwinkel. Hier kommen die nervösen Koppelungsvorgänge in der Netzhaut und Streulichterscheinungen im Auge zur Wirkung.

Der anschließende Knick, der dieses Gebiet mit dem Bereich der Blendwinkel $< 10^{\circ}$ verbindet, ist nur zu erklären, wenn man auf die Optik des Auges eingeht.

Betrachtet man eine Punktlichtquelle geeigneter Leuchtdichte (> 10 sb, am besten einige Hundert sb) gegen einen dunklen Hintergrund, so sieht man ein Strahlengebilde, das in Bild 19 zeichnerisch wiedergegeben ist. Deutlich sind zwei Merkmale zu erkennen: einmal der Kranz radialer Strahlen, zum anderen ein konzentrisches System von Ringen, welche in Wirklichkeit farbig sind. Von der Blendquelle aus folgen die Farben Gelb, Rot, Blau, Grün, Gelb Rot aufeinander, dann verschwinden die Ringe. Diese Figur ist noch von einer rasch wechselnden schuppigen Struktur überdeckt, die in der Zeichnung nicht dargestellt wurde.

Eine Analyse dieser Erscheinungen zeigt, daß es sich um Beugungsphänomene handelt, deren Ursache die Augenlinse und die Tränenflüssigkeit sind. Die Bilder 20 und 21 zeigen den Aufbau der Augenlinse. Sie ist, etwa einer Apfelsine vergleichbar, aus einzelnen Schalen zusammengesetzt. Von einer dreistrahligen Vordernaht ausgehend (Strahlenwinkel 120°) laufen die Fasern s-förmig über den Äquator zu der ebenfalls dreistrahligen Hinternaht. Die Vorder- und Hinternahtstrahlen sind um 60° gegeneinander gedreht, so daß, in die Äquatorialebene projiziert, ein sechszackiger Stern erscheint (Sternzacken). Durch den Faserverlauf zwischen Vorder- und Hinternaht entsteht ein Beugungsgitter, dessen Linien in den verschiedensten Richtungen liegen und das dementsprechend eine ringförmige Interferenzfigur liefert. Auch der Strahlenkranz des entoptischen

Bild 19 Strahlenfigur die man wahrnimmt, wenn eine nicht zu ausgedehnte Blendquelle hoher Leuchtdichte, unter kleinem Blendwinkel dargeboten wird. Gezeichnete Darstellung, photographiert.

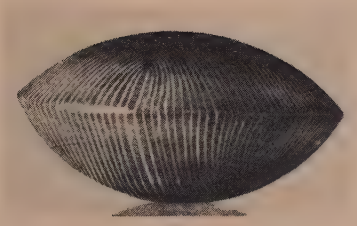


Bild 20 Modell einer Augenlinse mit dem charakteristischen Faserverlauf nach VOGT.

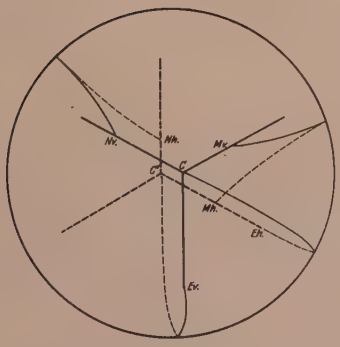


Bild 21 Schematische Darstellung der 3-teiligen Vorder- und Hinternaht der Augenlinse sowie der Art des Faserverlaufes. Eine Faser die vom hinteren Nahtende E h ausgeht, endet im vorderen Nahtzentrum C. Eine Faser, die von der vorderen Nahtmitte M v ausgeht, endet in der hinteren Nahtmitte M h. Eine Faser, die vom vorderen äußeren Drittel N v einer Naht ausgeht, endet im hinteren inneren Drittel N h usw.

Bildes erklärt sich zwanglos aus der Struktur der Augenlinse: ebenso wie die fünf- oder sechsstrahligen Sternzacken durch das Zusammenwirken der Vorder- und Hinternähte entstehen, kommt der Strahlenkranz durch die Faserstruktur des Linsenkörpers zustande. Beide Erscheinungen (Farbringe und Strahlenkranz) sind feststehend und können unter geeigneten Bedingungen gut beobachtet werden. Im aphaken (linsenlosen) Auge des Staroperierten fehlen diese Erscheinungen.

Die Ursache für die schuppige Struktur ist die Tränenflüssigkeit bzw. die in ihr enthaltenen zelligen Elemente. Zusätzlich besteht ein Einfluß der Linsenstruktur. Diese Erscheinung unterscheidet sich von den vorher beschriebenen dadurch, daß sie mit jedem Lidschlag stark wechselt, und auch in der Zwischenzeit in ständiger Bewegung ist.

Der Öffnungswinkel der ganzen Erscheinung liegt zwischen 12° und 20°. Der Knick in den Unterschiedsempfindlichkeits- bzw. Blendungsgradkurven tritt zwischen 6° und 10° auf, offenbar dann, wenn der Rand der entoptischen Figur (auch bei dunklem Testfeld) den Prüffleck erreicht.

Die Abhängigkeit des Durchmessers des entoptischen Bildes von der Leuchtdichte der Blendquelle zeigt Bild 22. Für eine Testfeldleuchtdichte von 0,03 asb ist die Unterschiedsempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Blendwinkel aufgetragen, wobei die Leuchtdichte der Blendquelle als Kurvenparameter fungiert. Es ist gut zu erkennen, daß mit abnehmender Leuchtdichte der Knick zu kleineren Blendwinkeln wandert. Offenbar ist aber auch bei geringen Leuchtdichten (2 sb) noch eine deutliche Krümmung festzustellen. Bei diesen Erscheinungen spielt neben der Leuchtdichte der Blendquelle auch die Beleuchtungsstärke am Auge eine gewisse Rolle, obgleich es - wie die Veränderung der Entfernung zeigt - nicht nur auf die Augenbeleuchtungsstärke ankommt. Eine Vergrößerung der Blendquelle verändert das Bild nicht wesen

lich, solange ihre Winkelausdehnung nicht der Größenordnung des entoptischen Bildes entspricht.

Im Blendwinkelbereich zwischen etwa 10° und $1{,}5^{\circ}$ überlagert sich dem eigentlichen Blendeinfluß (Streulicht, nervöse Koppelung) die Wirkung der entoptischen Erscheinung. Das führt zu einem steileren Abfall der Unterschiedsempfindlichkeit, bzw. einem steileren Anstieg des Blendungsgrades. Es ist nicht einfach, die Abhängigkeit des Blendungsgrades vom Blendwinkel formelmäßig darzustellen, da sowohl die Neigung der einzelnen Kurventeile als auch die Lage des Knicks von der Grundadaptation (Testfeldleuchtdichte), von der durch die Blendquelle erzeugten Augenbeleuchtungsstärke und bis zu einem gewissen Grad auch von der Blendquellenleuchtdichte abhängen. Trägt man den Blendwinkel logarithmisch an der Abszisse an (mit den kleinen Winkeln am Koordinatenschnittpunkt beginnend), so erhält man bei starker Blendung in erster Näherung Geraden. Diese lassen sich in der allgemeinen Form $\beta = a - b \log \theta$ darstellen. Es bedeuten $\beta = \log UE_o / UE$ = Blendungsgrad; $a = f(B, E_A)$; $b = F(B, E_A)$; θ = Blendwinkel. Geht man auf die Unterschiedsempfindlichkeit zurück, so erhält man

$$\frac{UE_o}{UE} = \frac{a'}{\theta^b}$$

und für konstante B und E_A folgt (weil dann auch UE_o konstant ist)

$$UE \sim \theta^b$$

Die Voraussetzung für den Ansatz $\beta = a - b \log \theta$ ist allerdings nur für große Augenbeleuchtungsstärke und kleine Testfeldleuchtdichte gegeben. Bild 23 zeigt, wie bei konstanter Testfeldleuchtdichte mit abnehmender Blendquellenleuchtdichte (Augenbeleuchtungsstärke) die Blendungsgrad-Blendwinkelkurven zunehmend stärker gekrümmt sind und ein linearer Verlauf nur noch für klei-

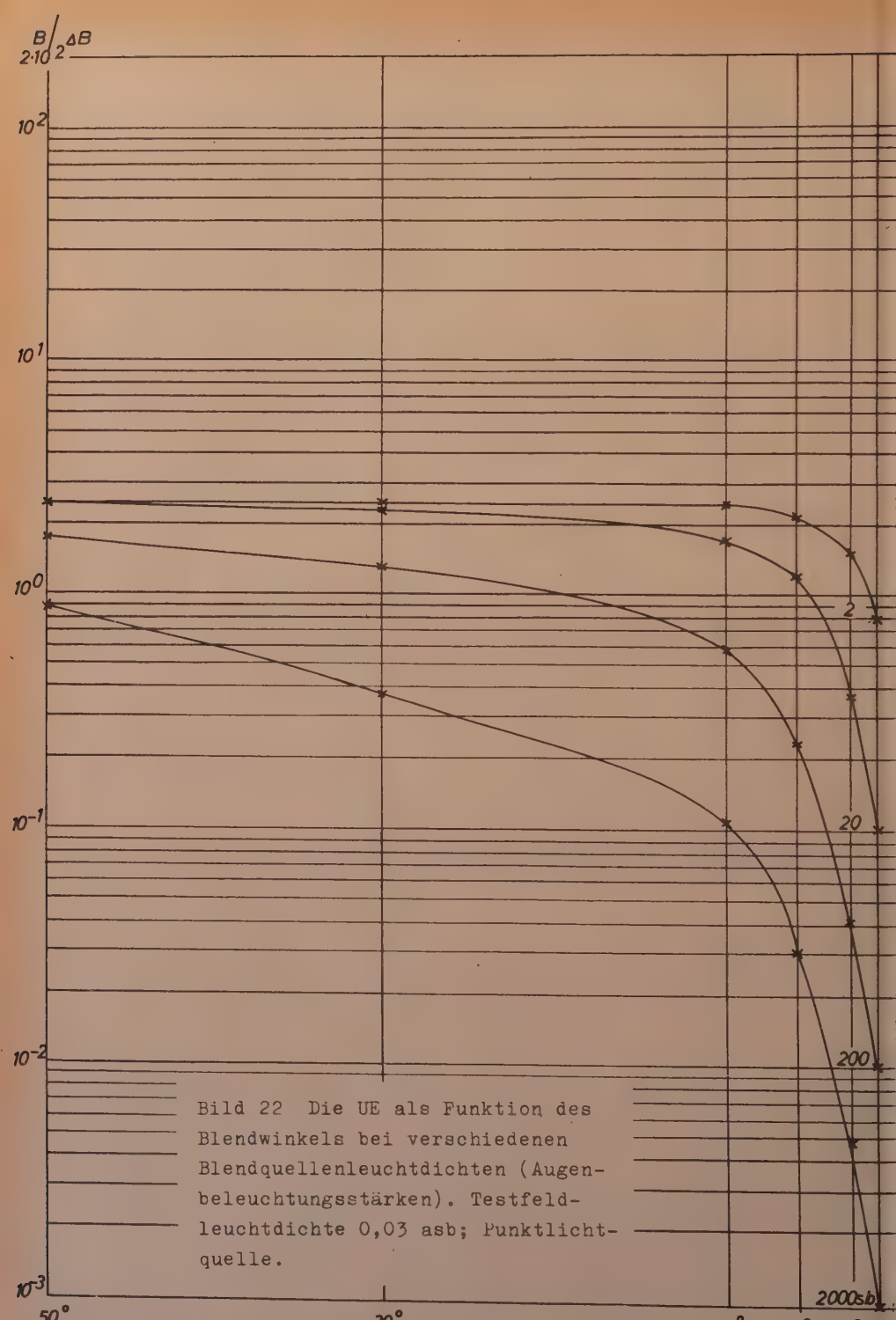


Bild 22 Die UE als Funktion des Blendwinkels bei verschiedenen Blendquellenleuchtdichten (Augenbeleuchtungsstärken). Testfeldleuchtdichte 0,03 asb; Punktlichtquelle.

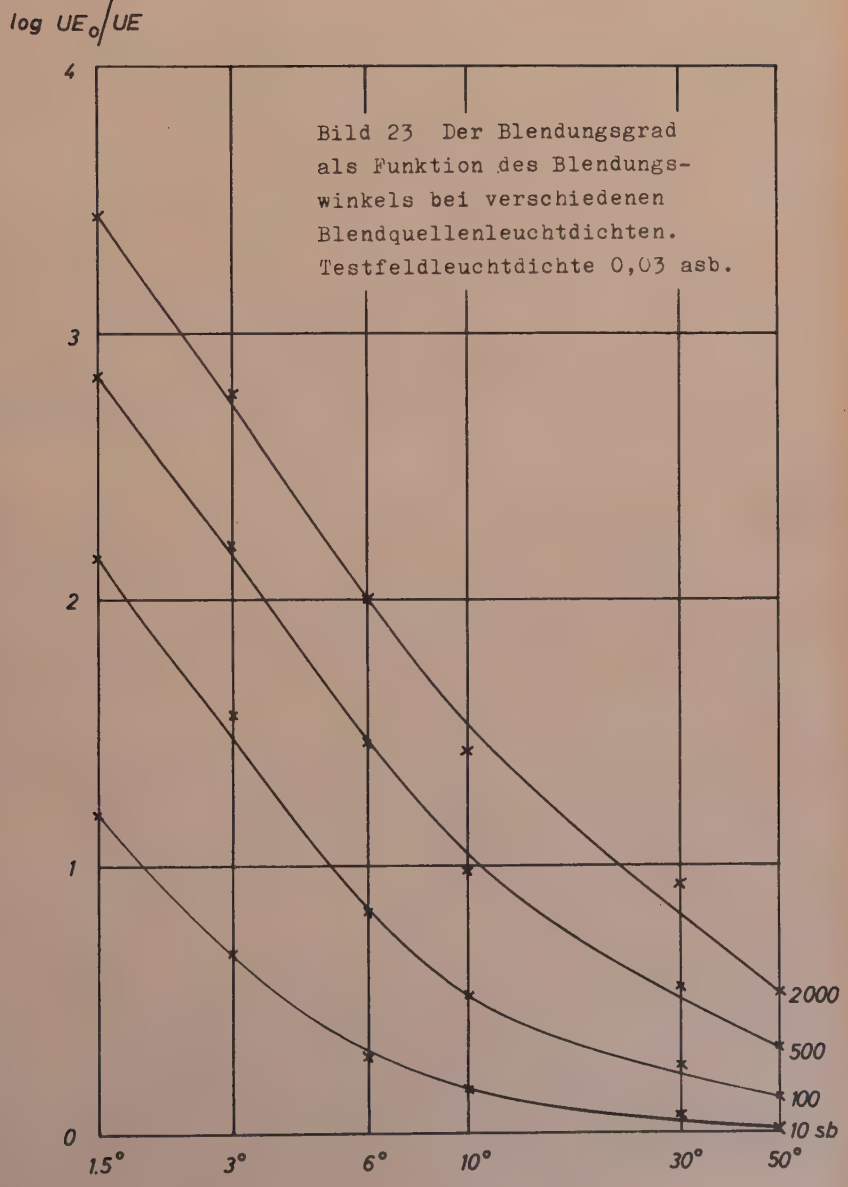


Bild 23 Der Blendungsgrad als Funktion des Blendungswinkels bei verschiedenen Blendquellenleuchtdichten. Testfeldleuchtdichte 0,03 asb.

ne Blendwinkel besteht. Das Entsprechende gilt, wie Bild 24 zeigt, wenn bei konstanter Blendquellenleuchtdichte (Augenbeleuchtungsstärke) die Testfeldleuchtdichte variiert wird.

Berechnet man b aus der Beziehung $\beta = a - b \log \theta$ für die geradlinigen Teile der Kurven, so erhält man $b \approx 2$ und damit $UE \sim \theta^2$ in Übereinstimmung mit HARRISON und HOLLADAY.

9) Zusammenfassung der verschiedenen Einflußgrößen

Faßt man die bisherigen Ergebnisse zusammen, so findet man, daß der Blendungsgrad im wesentlichen eine Funktion der Grundadaptation (Testfeldleuchtdichte), der von der Blendquelle verursachten Hornhautbeleuchtungsstärke und des Blendwinkels ist. Dementsprechend lassen sich die Zusammenhänge in einer zweiparametrigen Kurvenschar darstellen. Die Bilder 25, 26 und 27 zeigen die Unterschiedsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Blendquellenleuchtdichte (Hornhautbeleuchtungsstärke), wobei die Blendwinkel als Kurvenparameter und die Testfeldleuchtdichte als Scharparameter benutzt wurden. Bild 28 zeigt entsprechend den Blendungsgrad für eine Testfeldleuchtdichte von 0,03 asb (ausgezogen) und für eine Testfeldleuchtdichte von 0,3 asb (gestrichelt). Aus diesem Bild ist zu ersehen, daß eine einheitliche Blendformel, welche die Zusammenhänge auch im Bereich schwacher Blendung richtig wiederzugeben gestattet, nicht leicht ermittelt werden kann. Setzt man unter Benutzung der gefundenen näherungsweisen Beziehungen eine Blendformel an, so kommt man empirisch zu folgendem Ergebnis:

$$\beta = \log \left(\frac{c \; E_H}{\theta^2} + B + 1 \right) - \log \left(B + 1 \right)$$

Die dimensionslose Konstante c hat etwa den Wert 100; E_H ist die von der Blendquelle erzeugte Hornhautbeleuchtungsstärke in lx; θ der Blendwinkel in Grad; (der Umrechnungsfaktor ins Bogenmaß ist in der Konstanten enthalten) B die Testfeld- bzw. Grundadaptations-Leuchtdichte in asb. Da $\beta = \log UE_o/UE$ ist,

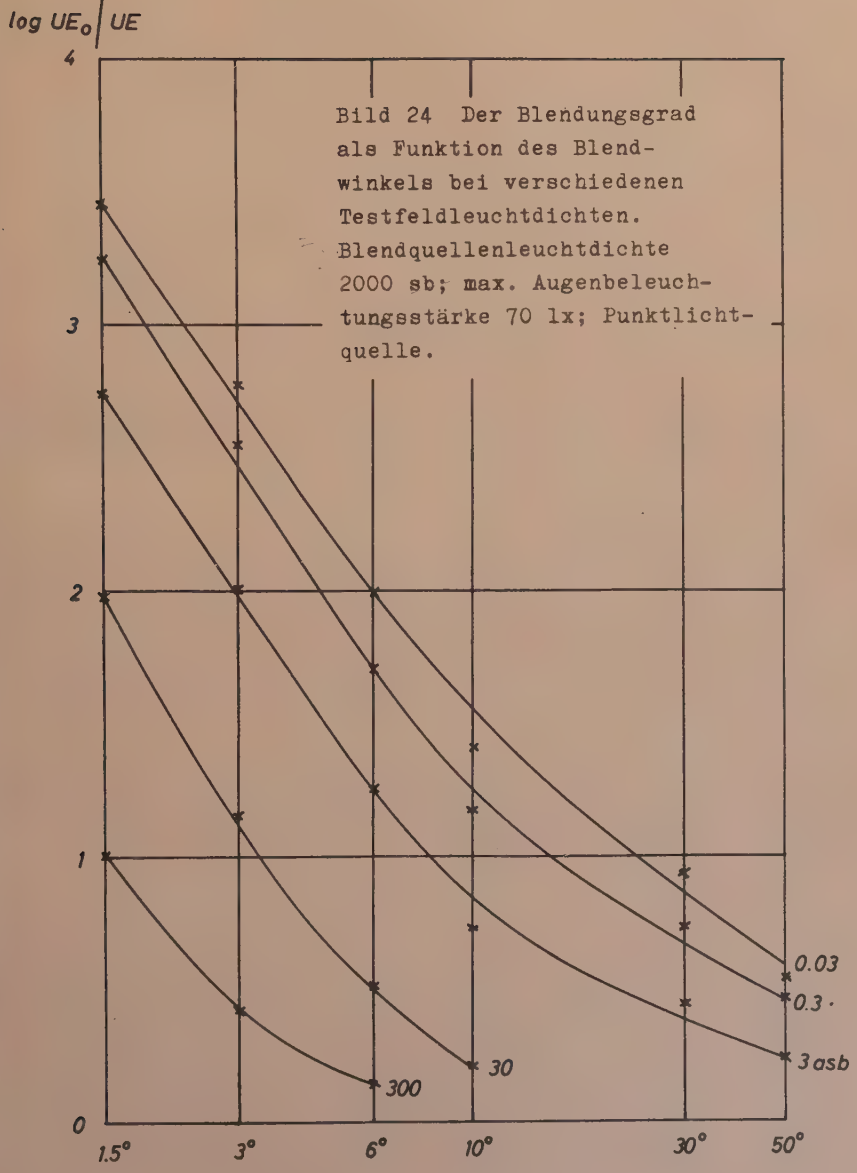


Bild 24 Der Blendungsgrad als Funktion des Blendwinkels bei verschiedenen Testfeldleuchtdichten. Blendquellenleuchtdichte 2000 sb; max. Augenbeleuchtungsstärke 70 lx; Punktlichtquelle.

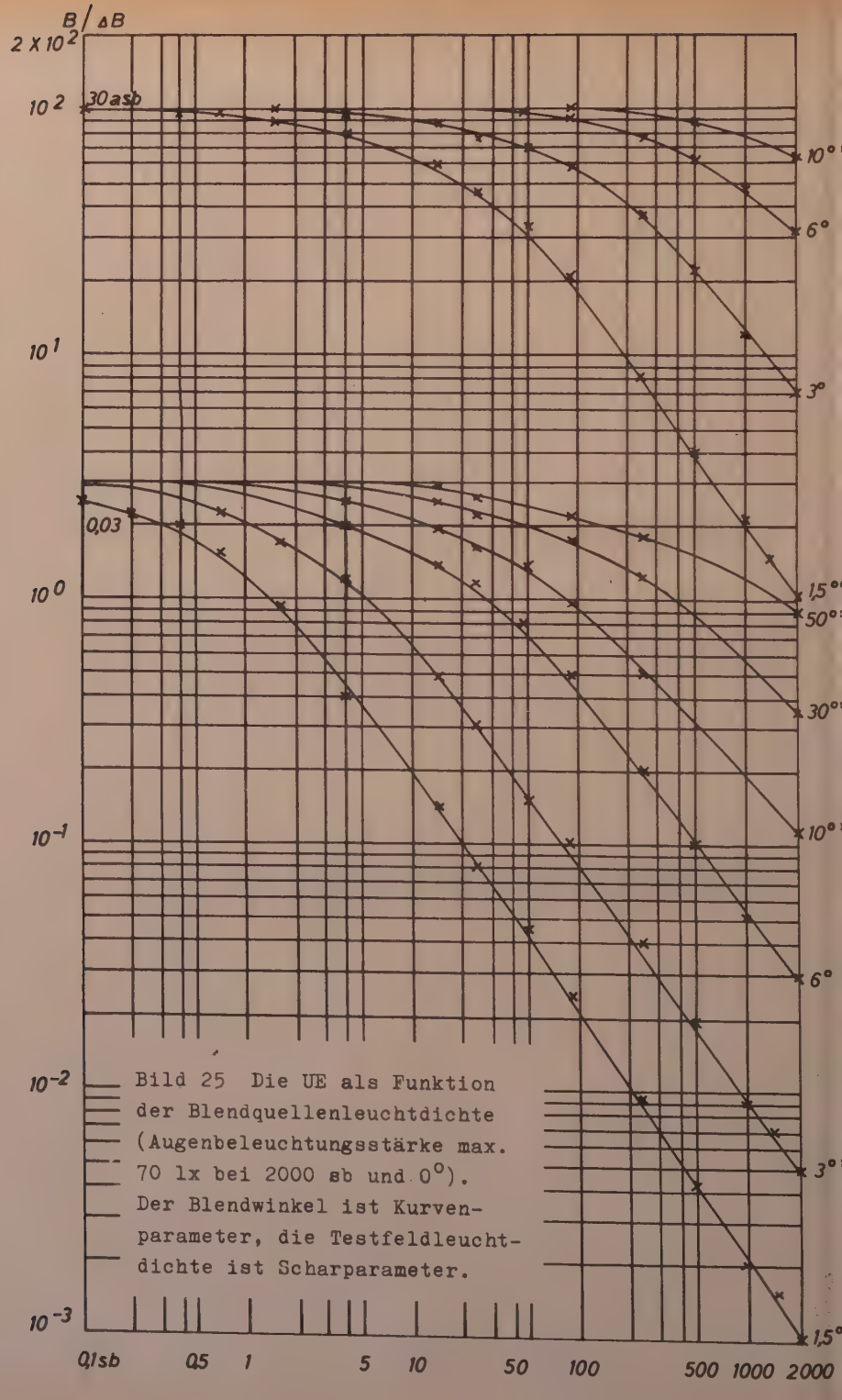


Bild 25 Die UE als Funktion der Blendquellenleuchtdichte (Augenbeleuchtungsstärke max. 70 lx bei 2000 sb und 0°). Der Blendwinkel ist Kurvenparameter, die Testfeldleuchtdichte ist Scharparameter.

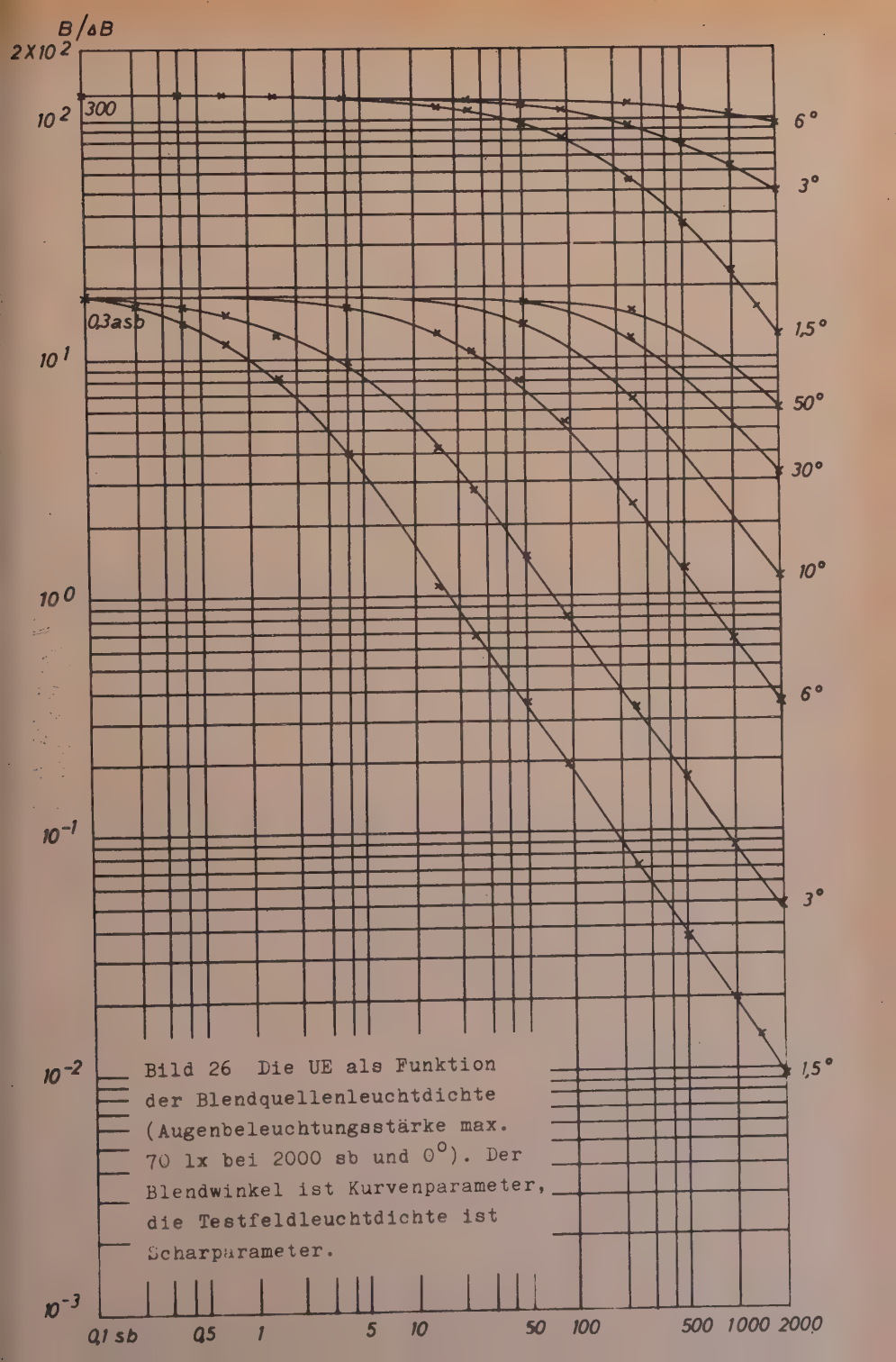


Bild 26 Die UE als Funktion der Blendquellenleuchtdichte (Augenbeleuchtungsstärke max. 70 lx bei 2000 sb und 0°). Der Blendwinkel ist Kurvenparameter, die Testfeldleuchtdichte ist Scharparameter.

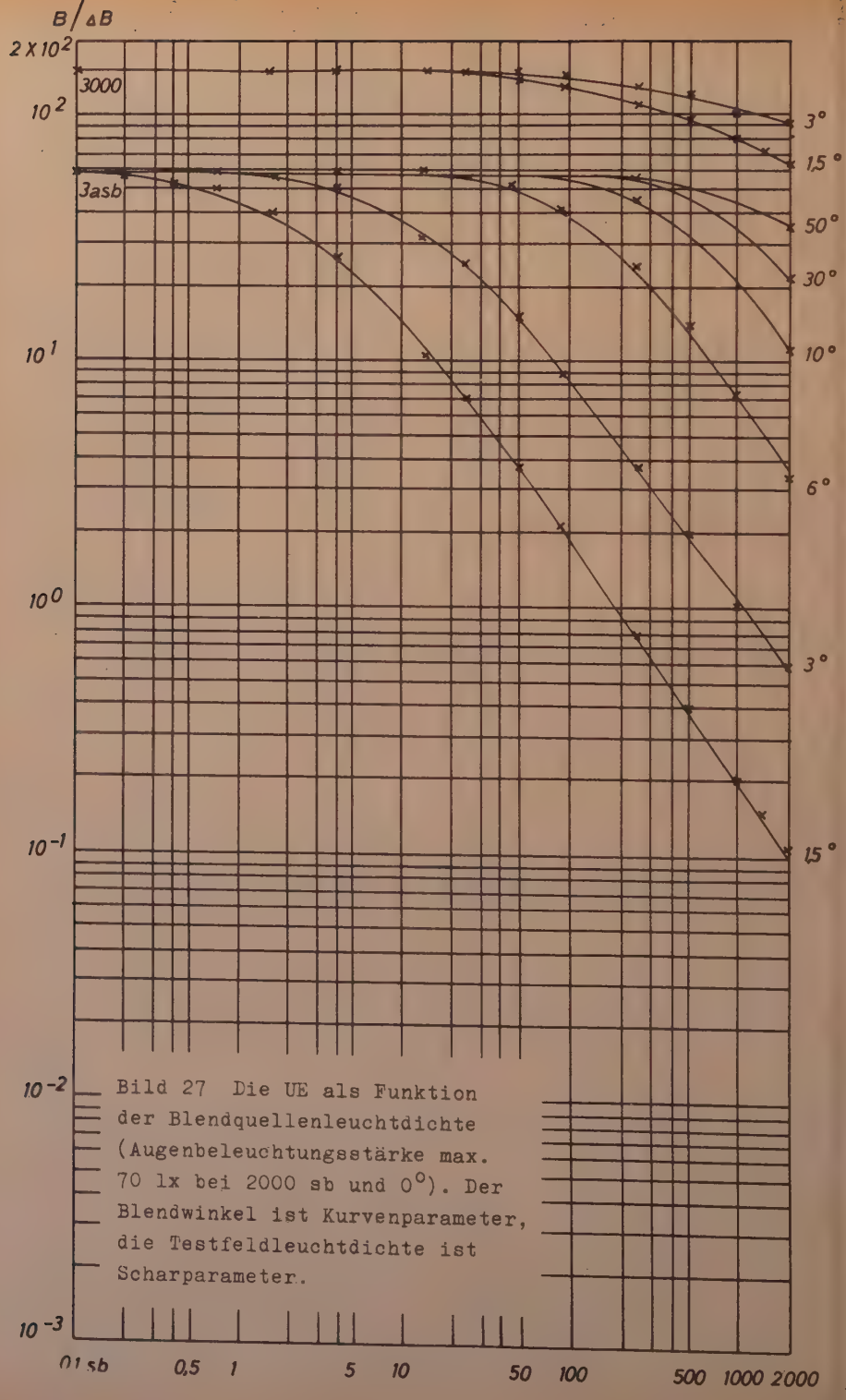


Bild 27 Die UE als Funktion der Blendquellenleuchtdichte (Augenbeleuchtungsstärke max. 70 lx bei 2000 sb und 0°). Der Blendwinkel ist Kurvenparameter, die Testfeldleuchtdichte ist Scharparameter.

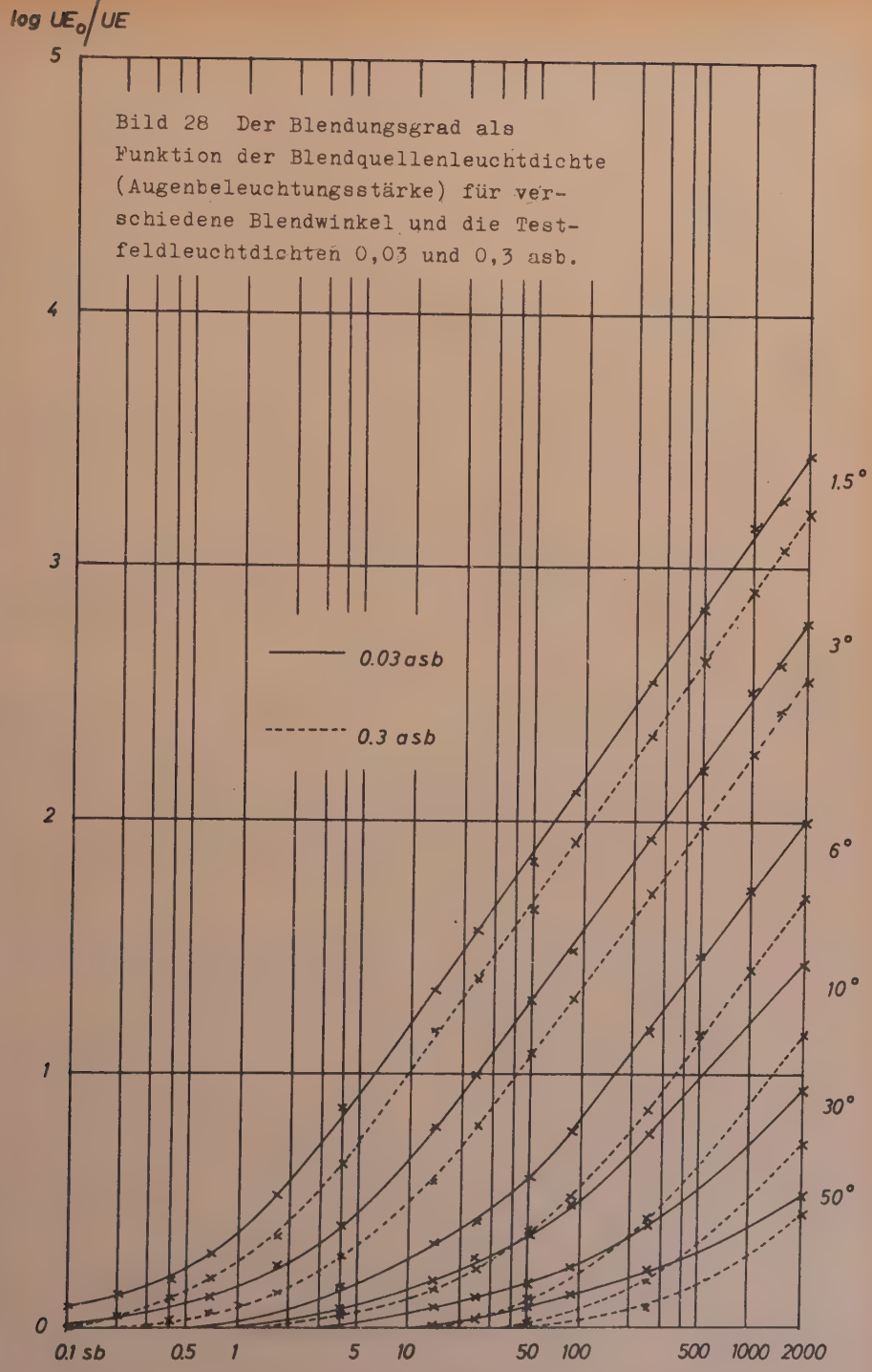


Bild 28 Der Blendungsgrad als Funktion der Blendquellenleuchtdichte (Augenbeleuchtungsstärke) für verschiedene Blendwinkel und die Testfeldleuchtdichten 0,03 und 0,3 asb.

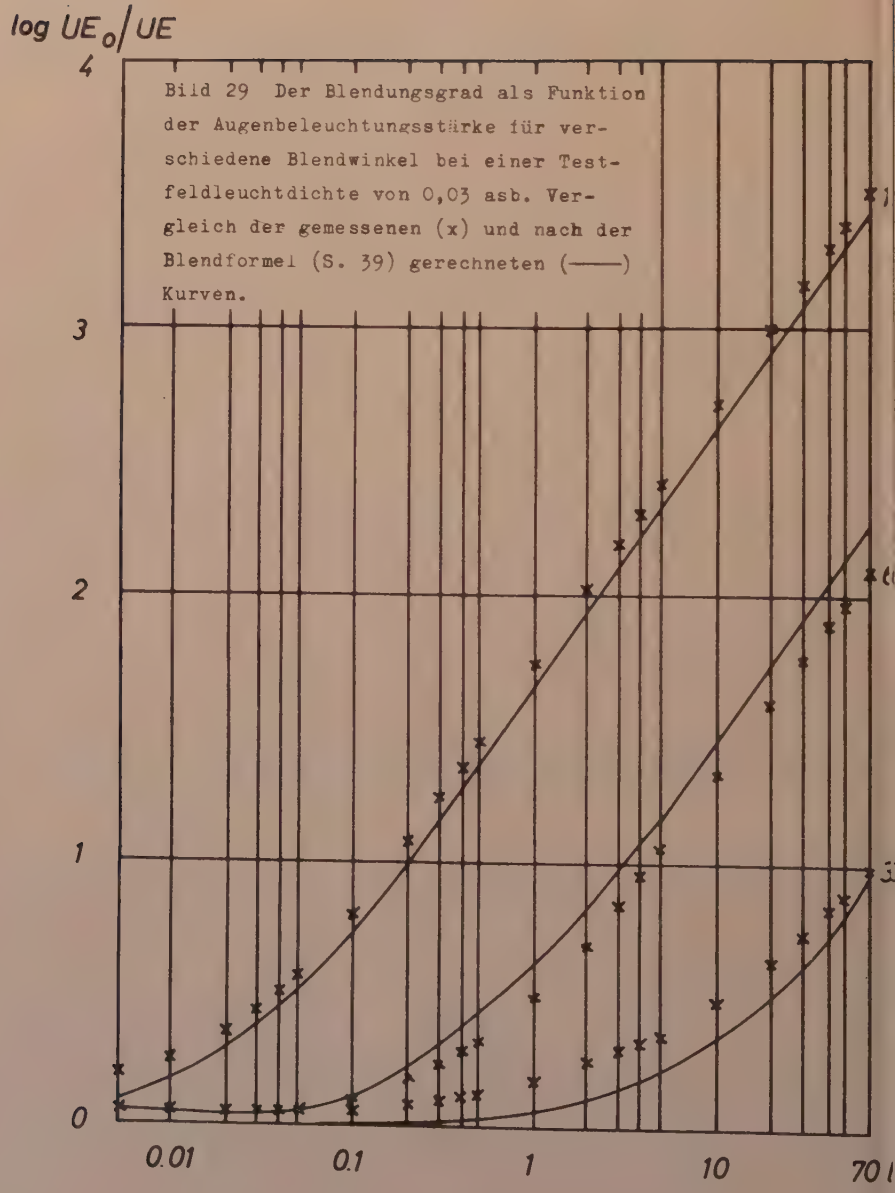


Bild 29 Der Blendungsgrad als Funktion der Augenbeleuchtungsstärke für verschiedene Blendwinkel bei einer Testfeldleuchtdichte von 0,03 asb. Vergleich der gemessenen (x) und nach der Blendformel (S. 39) gerechneten (——) Kurven.

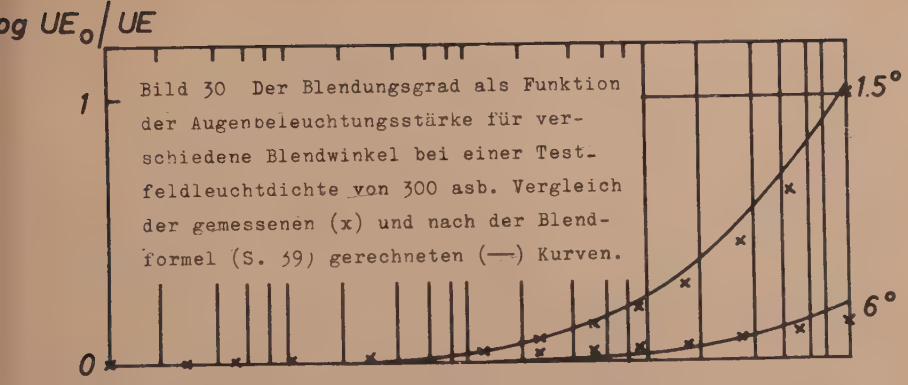


Bild 30 Der Blendungsgrad als Funktion der Augenbeleuchtungsstärke für verschiedene Blendwinkel bei einer Testfeldleuchtdichte von 300 asb. Vergleich der gemessenen (x) und nach der Blendformel (S. 39) gerechneten (—) Kurven.

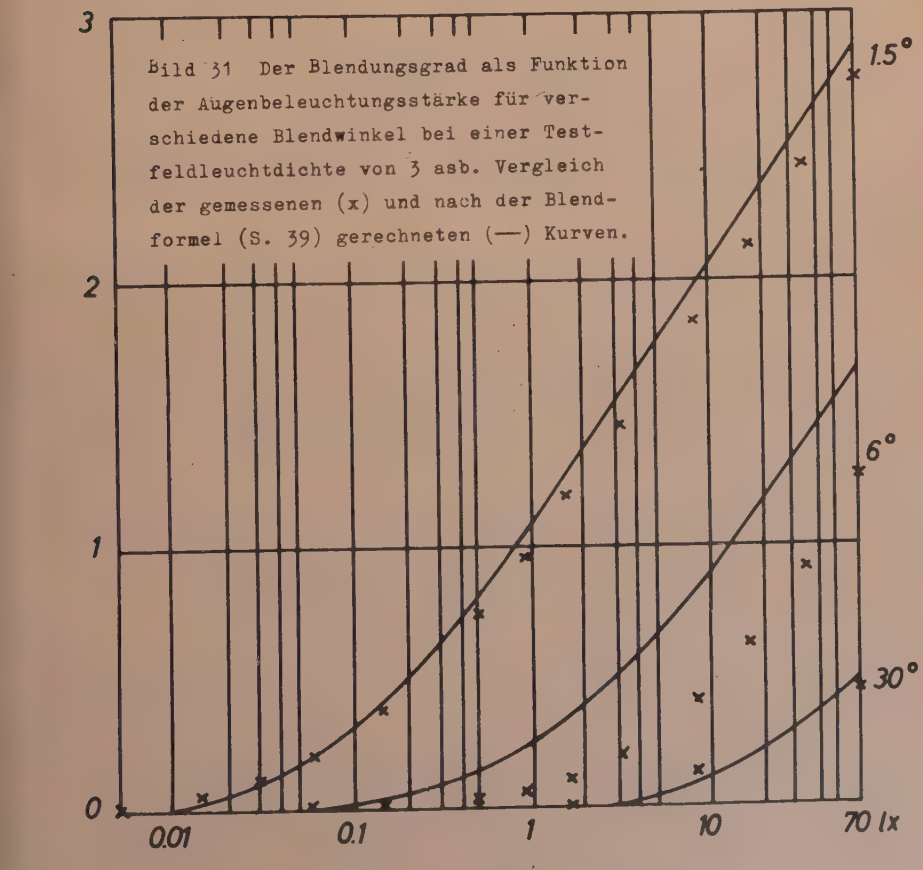


Bild 31 Der Blendungsgrad als Funktion der Augenbeleuchtungsstärke für verschiedene Blendwinkel bei einer Testfeldleuchtdichte von 3 asb. Vergleich der gemessenen (x) und nach der Blendformel (S. 39) gerechneten (—) Kurven.

läßt sich diese Beziehung auch in der Form

$$\frac{UE_o}{UE} = \frac{(c\, E_H / \theta^2) + B + 1}{B + 1}$$

anschreiben. Die logarithmische Form ist aber, wie aus den früheren Darstellungen hervorgeht, dem physiologischen Geschehen besser angepaßt.

Die Bilder 29, 30 u. 31 zeigen, daß diese Beziehung die gemessenen Werte in vielen Fällen gut wiederzugeben vermag, wenn auch gelegentlich größere Abweichungen vorkommen. Die Aufstellung einer endgültigen Blendformel würde vor allem voraussetzen, daß eine größere Zahl von Messungen eines repräsentativen Bevölkerungsquerschnitts vorliegt. Im Augenblick ermöglicht diese Beziehung nur eine Abschätzung der Sehleistung (einfaches Formenerkennen) die günstigstenfalls erreichbar ist. Es soll aber damit der Versuch gemacht werden, unmittelbar eine Aussage über die Änderung der Sehleistung bei Blendwirkung zu erhalten. Weitere Messungen sind im Gange.

Die angegebene Blendformel stimmt in ihren Elementen mit derjenigen von L.L. HOLLADAY überein. Es erscheint aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen nicht gerechtfertigt, daß in der Blendformel von V.G.W. HARRISON die Leuchtdichte und die Fläche der Blendquelle sowie ihr Abstand auftreten.

Ein Vorteil des hier verwendeten Blendungsgrades ist es, daß sich äußere Störeinflüsse, wie auch mangelnde Aufmerksamkeit des Beobachters auf UE und UE_o gleichsinnig auswirken. Inwieweit dabei das Verhältnis UE_o/UE konstant bleibt, bedarf allerdings noch genauerer Untersuchungen. Eine Ausnahme bilden lediglich Trübungen der Augenlinse, die bei Blendung (wegen der Streulichtbildung) UE stärker beeinflussen als UE_o (s. S. 44 f).

10) Das Additionstheorem der Blendung

Versuche mit vier Blendquellen, welche unter verschiedenen Blendwinkeln und mit verschiedener Hornhautbeleuchtungsstärke wirkten, haben gezeigt, daß es zulässig ist, ein Additionstheorem der Blendung aufzustellen. Demnach gilt für k Blendquellen bei einheitlicher Infeldleuchtdichte folgende Beziehung:

$$\beta = F\left[B, \sum_{i=1}^{k} f(E_i\ \Theta_i)\right]$$

d.h. der Blendungsgrad ist eine Funktion der Infeldleuchtdichte und der Summe einer anderen Funktion (Blendgewicht), die vom Blendwinkel und von der durch die Blendquelle erzeugten Hornhautbeleuchtungsstärke abhängt. Im Gültigkeitsbereich der Blendformel - s. S.40- lautet diese für mehrere Blendquellen:

$$\beta_k = \log\left[c \sum_{i=1}^{k} \frac{E_i}{\Theta_i^2} + B + 1\right] - \log(B + 1)$$

Bei kleiner Infeldleuchtdichte ($\log(B + 1) \to 0$) vergrößert sich z.B. bei k gleichartigen Blendquellen (gleiche Hornhautbeleuchtungsstärke und gleicher Blendwinkel) der Blendungsgrad um log k.

11) Der Blendwinkel bei ausgedehnten Blendquellen

Die Betrachtungen des vorangehenden Abschnittes zeigen den Weg, der zu einer Definition des Blendwinkels ausgedehnter Blendquellen führt. Teilt man die Blendfläche in einzelne Flächenelemente auf, die so klein sind, daß man den Blendwinkel gegen ihre Mitte rechnen kann - s.S.28- so ist der wahre Blendwinkel, den eine ausgedehnte Blendquelle mit der Sehrichtung einschließt, durch die Beziehung gegeben:

$$\theta = \sqrt{\frac{E_G}{\sum_1^n E_i/\theta_i^2}}$$

Es bedeuten: E_G die Gesamthornhautbeleuchtungsstärke, die von der ausgedehnten Blendquelle erzeugt wird; E_i und θ_i Hornhautbeleuchtungsstärke und Blendwinkel eines Flächenelementes. Diese Formel gilt insbesondere auch für mehrere einzelne Blendquellen. Sind die Beiträge der einzelnen Flächenelemente zur Gesamtbeleuchtungsstärke untereinander gleich (was für nicht zu große Flächen und kleine Winkel angenommen werden kann) so geht die Beziehung bei n Flächenelementen, wegen $E_G = nE$ über in:

$$\theta = \sqrt{\frac{n}{\sum_1^n 1/\theta_i^2}}$$

Diese Beziehung kann zur Abschätzung des Blendwinkels dienen.

12) Einäugige - beidäugige Blendung

Grundsätzlich sind bei dem gewählten Kontrast-Formentest die beidäugigen Unterschiedsempfindlichkeitswerte ohne und mit Blendung etwas besser als bei entsprechender einäugiger Beobachtung. Ein wesentliches Moment zur Erklärung dieser Erscheinung dürfte die Schwierigkeit der einäugigen Akkommodationseinstellung an der Kontrastschwelle bilden. Andererseits ist bekannt, daß die absolute Empfindlichkeit im Dämmerungssehen beidäugig höher liegt, wobei allerdings noch nicht geklärt ist, inwieweit auch hier Akkommodationsschwierigkeiten bestehen.

Blendet man unter einem Blendwinkel von 90°, so daß ein Auge im Nasenschatten liegt, dann erhält man praktisch die gleichen Unterschiedsempfindlichkeitswerte, wenn man einmal das geblendete Auge offen läßt, das andere Mal vollkommen schließt. Entsprechende Versuche bei anderen Blendwinkeln, wobei ein Auge durch eine geeignete Blende gegen die Blendquelle (nicht gegen den Prüffleck) abgeschirmt wurde, zeigten ein entsprechendes Ergebnis. Offenbar ist es gleichgültig, ob ein Auge vollkommen abgedeckt oder geblendet wird; es kommt nur auf seine Ausschaltung an. In beiden Fällen wird jeweils die einäugige Unterschiedsempfindlichkeit erreicht.

Wenn man in Bild 17 trotzdem ein leichtes Ansteigen der Unterschiedsempfindlichkeitswerte zwischen 70° und 90° (ein Auge im Nasenschatten) beobachtet, so hat das hauptsächlich folgenden Grund: Obwohl der Hornhautscheitel im Schatten liegt, werden doch die oberen Ränder der Augenhöhle und die Wimpern noch beleuchtet, und es tritt Streulicht ins Auge ein. Es wird also nicht der gleiche Adaptationszustand erreicht, wie etwa bei 90°, wo die ganze Augenhöhle und die Bewimperung im Schatten liegen.

Wird die Blendwinkelabhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit einäugig gemessen, (z.B. für die linke Gesichtsfeldhälfte, wobei das rechte Auge abgedeckt ist) so liegen die Unterschiedsempfindlichkeitswerte für alle Blendwinkel, die größer sind als der Abschattungswinkel, niedriger als bei beidäugiger Beobachtung. Dieser Effekt ist sehr viel größer als dem oben genannten allgemeinen Unterschied zwischen ein- und beidäugiger Beobachtung entsprechen würde. Das ist auch ohne weiteres verständlich, weil die hohe Empfindlichkeit des blendfreien, aber auch gegen das Testzeichen abgedeckten Auges, nicht ausgenutzt werden kann.

13) Die Wirkung von Windschutzscheiben und Brillengläsern bei Blendung

Für die Praxis ist der Einfluß von Windschutzscheiben und Brillengläsern auf die Blendung von großer Bedeutung. Es sollen daher abschließend Meßergebnisse mitgeteilt werden, die eine qualitative Stellungnahme zu diesem Problem ermöglichen. Die Untersuchungen sind auf Blendwinkel zwischen $1{,}5^{\circ}$ und 20° beschränkt. Die Blendquelle war punktförmig, ihre Leuchtdichte 2 000 sb, die Hornhautbeleuchtungsstärke etwa 70 lx. Zwischen Beobachter einerseits und Blendquelle bzw. Prüffleck andererseits wurden im Abstand von 20 cm abwechselnd planparallele Glasplatten (Fensterglas) gebracht, die a) labormäßig gereinigt, b) leicht verschmutzt und c) stark verschmutzt waren. Der Verschmutzungsgrad wurde dem Problem entsprechend so festgelegt, daß ohne Blendquelle die saubere und die leicht verschmutzte Scheibe keine Differenz der Unterschiedsempfindlichkeit gegenüber der Messung ohne Scheibe zeigten. Die stark verschmutzte Scheibe setzte die Unterschiedsempfindlichkeit schon ohne Blendquelle um 25 % herab.

Wurden die entsprechenden Messungen mit Blendquellen durchgeführt, so ergab sich ohne und mit gereinigter Scheibe praktisch der gleiche, zum jeweiligen Blendwinkel gehörige Unterschiedsempfindlichkeitswert. Mit der leicht verschmutzten Scheibe war der Wert 1/2 bis 1/3, mit der stark verschmutzten Scheibe nur 1/20 bis 1/30 so groß wie bei der sauberen Scheibe oder ohne diese. Das Ergebnis hängt, außer vom Blendwinkel auch noch von der Art der Verschmutzung und von der Entfernung zwischen Beobachter und Glasplatte ab. Die stark verschmutzte Scheibe setzt bei einer Entfernungsänderung von 5 cm auf 100 cm - mit Blendung - die Unterschiedsempfindlichkeit im Verhältnis 2 : 1 herab. Die leicht verschmutzte Scheibe entsprechend weniger.

Die Ursache für diese Erscheinung ist der im trüben Medium entstehende Streulichthof, der das Sehobjekt (Testfleck) überdeckt und dessen photometrischen Kontrast herabsetzt. Die Untersuchung zeigt, welche Bedeutung der Streulichtbildung bei Blendvorgängen zukommt und welchen Einfluß verschmutzte Windschutzscheiben (oder Brillengläser) im Straßenverkehr haben können. Gleichzeitig wird aber auch demonstriert, wie stark sich Trübungen der Hornhaut oder der Augenlinse auf die Blendempfindlichkeit auswirken.

Zusammenfassung

Eine Untersuchung derjenigen Parameter, welche die statische physiologische Blendung beeinflussen, zeigt, daß bei vorgegebenem Kriterium nur der Blendwinkel, die Hornhautbeleuchtungsstärke und das Grundadaptationsniveau (ohne Störlichtquelle) von Bedeutung sind. Die geringe untergeordnete Wirkung der Blendquellen-Leuchtdichte kann vernachlässigt werden. Der Einfluß der Blendquellenfläche läßt sich auf die Winkelabhängigkeit zurückführen. Eine Reaktion auf die Lichtfarbe ist nicht festzustellen. Es zeigt sich, daß die unterschiedliche Wirkung einer Blendquelle bei gleichem Blendwinkel aber verschiedenen Lagen im Gesichtfeld (oben, unten oder seitlich) durch anatomische Gegebenheiten (Augenhöhlen, Nasenform, Bewimperung) bedingt ist. Schließlich wird eine Blendformel angegeben, welche die Zusammenhänge mit einer für die meisten praktischen Zwecke ausreichenden Genauigkeit liefert.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. Dr. Herbert Schober, für die Anregung zu dieser Arbeit, für das stetige Interesse und für seine wertvolle Hilf
An zweiter Stelle danke ich Fräulein Karin Braun, die sich als unermüdlicher Normbeobachter für viele tausend Einzelmessungen geopfert hat und der Sache immer persönlich verbunden war. Ich danke auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die durch Personal- und Sachmittel wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Der Joachim Jungius-Gesellschaft der Wissenschaften e. V. in Hamburg verdanke ich die leihweise Überlassung eines Universalphotometers von Schmidt und Haensch, den Firmen Osram und Schott die kostenlose Lieferung verschiedener Lampen und Filtergläser.

Literaturverzeichnis

ARNDT, W.
Über die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges.
Licht (1937) 101 - 104
- Uber das Angenehme und Behagliche in der Beleuchtung.
Lichttechnik 8 (1956) Heft 3, S. 99 - 103

DE BOER, J. B.
Untersuchungen über den Einfluß der Lichtfarbe auf das Sehen im Straßenverkehr.
Zentralbl. für Verkehrs-Medizin 6 (1960), 3 - 20
- Blendung beim nächlichen Straßenverkehr.
Zentralbl. für Verkehrs-Medizin 3 (1957), 185 - 203

BORN, F. und WOLF, M.
Blendungsversuche an Automobilscheinwerfern.
Licht 2 (1932), 154 - 166

BOUMA, P. J.
Sehschärfe und Wahrnehmungsgeschwindigkeit bei der Straßenbeleuchtung.
Philips Techn. Rundschau 1 (1936), 215 - 220
- Eigenschaften des Auges unter Berücksichtigung ihrer Bedeutung für die Straßenbeleuchtung.
Philips Techn. Rundschau 1 (1936), 102 - 106
- Die Wahrnehmung von Helligkeitskontrasten bei der Straßenbeleuchtung.
Philips Techn. Rundschau 1 (1936), 166 - 169
- Die Blendungsfrage bei der Straßenbeleuchtung.
Philips Techn. Rundschau 1 (1936), 225 - 229
- Objektwahrnehmung auf der Straße bei niedrigen Leuchtdichten.
Philips Techn. Rundschau 9 (1947), 150 - 159

BOYNTON, R. M., ENOCH, J. M. und BUSH, W. R.
Physical Measures of Stray Light in Excised Eyes.
Journ. Opt. Soc. Amer. 44 (1954), 879 - 886

DRESLER, A.
Neue Methoden der Blendungsbewertung.
Archiv für Techn. Messen 1954, Heft 1 V 464 - 2

FISCHER, D.
Heutiger Stand der Blendungsbewertung in Innenräumen.
Lichttechnik 10 (1958), 465 - 468

FRY, G. A.
Physiological Base of Disability Glare.
CIE - Kongreß 1955
- The Evaluation of Discomfort Glare.
Ill. Eng. 51 (1956), 722 - 728

FRY, G. A. und ALPERN, M.
The Effect of a Peripheral Glare Source Upon the Apparent Brightness of an Object.
Journ. Opt. Amer. 43 (1953), 189 - 195

HARRISON, V. G. W.
Siehe SCHOBER, H. Das Sehen Bd. II

HOLLADAY, L.
Action of a Light Source in the Field of View in Lowering Visibility.
Journ. Opt. Soc. Am. 14 (1927), 1 - 15
- The Fundamentales of Glare and Visibility.
Journ. Opt. Soc. Am. 12 (1926), 271 - 319

KATZ, J.
Untersuchungen über farbige Blendung.
Klin. Mbl. Augenhk. 114 (1949), 548 - 556

KLEIN, C. G.
Psychologische Bewertungsmethode für Straßen- und Verkehrsbeleuchtung.
Licht und Lampe 20 (1931), 163 - 166 u. 191 - 196

KLEIN, C. G., WEIGEL, R. G. und ARNDT, W.
Einfluß der Lichtfarbe auf die Grundempfindungen.
SEWIG Handbuch der Lichttechnik Springer Berlin 1938, 579 - 58

KÖNIG, A. und BRODHUN, E.
Die Helligkeitsempfindlichkeit der Netzhaut.
Sitz.-Ber. Preuß. Akad. Wiss. 8 (1888), 917 - 931

LOSSAGK, H.
Die Blendstörungen im Straßenverkehr.
Deutsche Kraftfahrforschung, 1955, Heft 90

LUCKIESH, M.
Light, Vision and Seeing.
D. Van Norstrand Company, Inc. New York 1948

MOON, P. , SPENCER, D. E.
The Visual Effect of Non-Uniform Surrounds.
Journ. Opt. Soc. Am. 35 (1945), 233 - 248

PAHL, A. und CHODURA, R.
Zum Blendungsproblem in der Straßenbeleuchtung.
Lichttechnik 8 (1956), 480 - 486

PURKINJE, J. E.
Siehe SCHOBER, H. Das Sehen Bd. I

SCHNEIDER, L.
Der Einfluß der Beleuchtung auf die Leistungsfähigkeit des Menschen.
Licht und Lampe 16 (1927), 803 - 806 u. 842 - 846

SCHOBER, H.
Das Sehen.
Band I und II Fachbuchverlag Leipzig 1957 u. 1958

SCHÖNWALD, B.
Die Beobachtung von Lichtreizen kleiner Sehwinkelgrößen auf einem Umfeld hoher Leuchtdichte.
Licht 9 (1939), 197 - 201

SCHUMACHER, R. O.
Die Unterschiedsempfindlichkeit des Helladaptierten menschlichen Auges.
Dissertation Techn. Hochschule Berlin-Charlottenburg 1940

STILES, W.S.

The Effects of Glare on the Brightness Difference Threshold.

Proc. Roy. Soc., B. Serie, 104 (1927), 322 - 351

VOGT, A.

Lehrbuch u. Atlas der Spaltlampenmikroskopie des lebenden Auges.

Teil II Verlag Springer, Berlin 1931

WEBER-FECHNER

Siehe SCHOBER, H. Das Sehen Bd. II

YVES LE GRAND

Recherches sur la Diffusion de la Lumière dans l'Oeil Humain.

Rev. d'Optique 16 (1937), 202 u. 241

Zusammenstellung der verwendeten Buchstaben und Zeichen

B	Bei Holladay (S.7) durchschnittliche Gesichtsfeldleuchtdichte; sonst Leuchtdichte des Test- oder Infeldes
B_A	Adaptationsleuchtdichte ohne Blendquelle (Holladay)
B_A*	Adaptationsleuchtdichte mit Blendquelle (Holladay)
B_L	Leuchtdichte der Blendquelle
B_S	Schleierleuchtdichte nach Holladay
ΔB	Leuchtdichteunterschied
$B/\Delta B$	Unterschiedsempfindlichkeit
c,c'	Konstanten
E	Beleuchtungsstärke
E_A	Hornhaut-, Augenbeleuchtungsstärke
F	Fläche der Blendquelle
G	Blendgröße nach Harrison
I	Lichtstärke
k	Zahlenwert (dimensionslos) der bei Harrison den Adaptationszustand berücksichtigt und aus einer Tabelle zu entnehmen ist
R	Abstand Blendquelle - Auge
UE	Unterschiedsempfindlichkeit
u	Halber Öffnungswinkel einer Lichtquelle
	Blendungsgrad (S. 29 definiert)
θ	Blendwinkel (Winkel zwischen den Verbindungsgeraden Auge - Sehobjekt und Auge - Blendquelle
$\mu_{\Delta B}$	mittlerer Fehler der Δ B Werte
$\mu_{B/\Delta B}$	mittlerer Fehler der $B/\Delta B$ Werte
ω	Raumwinkel

Lebenslauf.

Am 24. Februar 1924 wurde ich, als Sohn des Konditors Sylvester Hartmann und seiner Ehefrau Maria geb. Regnath, in Regensburg Opf. geboren. 1925 übersiedelten meine Eltern nach München. Nach fünfjährigem Volksschulbesuch trat ich 1936 in die Rupprecht-Oberschule über. Am Ende des siebenten Schuljahres kam ich 1943 zum Arbeitsdienst und anschließend zum Militär. Im Jahre 1945 wurde ich, 50 % kriegsbeschädigt, entlassen. In den ersten Nachkriegsjahren reparierte ich amerikanische Funkgeräte. Nachdem ich einen Förderungskurs der Universität München absolviert und einen halbjährigen Pflichthilfsdienst zum Wiederaufbau der Universität abgeleistet hatte, begann ich 1949 mit dem Studium der Physik. 1954 legte ich die Diplomvorprüfung ab. Die Diplomarbeit führte ich unter der Anleitung von Prof. Dr. W. Gerlach durch. Das Thema dieser Arbeit lautete: Der Permeabilitätsverlauf von Nickel in der Umgebung des Curie-Punktes bei mechanischer Beanspruchung. Im Jahre 1957 wurde die Diplomhauptprüfung abgelegt. Anschließend kam ich an das neuerrichtete Institut für Medizinische Optik der Universität München, zu Prof. Dr. Dr. H. Schober und arbeitete dort über Fragen der physiologischen Optik und Lichttechnik.